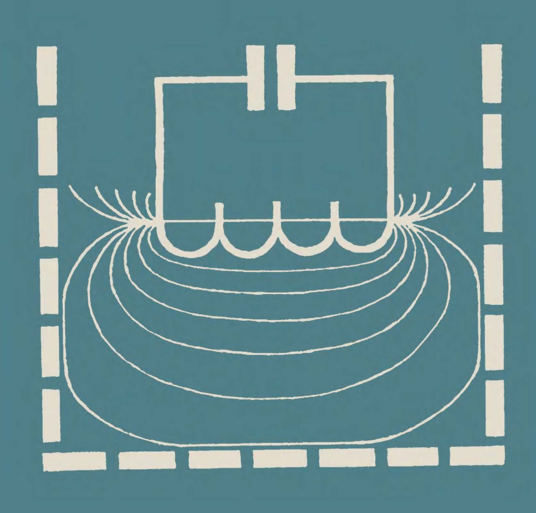




М. Л. ВОЛИН

ПОДАВЛЕНИЕ ВНЕШНИХ ПАРАЗИТНЫХ СВЯЗЕЙ В УСИЛИТЕЛЯХ



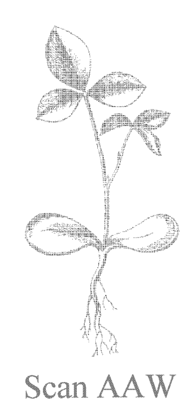
МАССОВАЯ
РАДИО
БИБЛИОТЕКА

Выпуск 926

М. Л. ВОЛИН

ПОДАВЛЕНИЕ ВНЕШНИХ ПАРАЗИТНЫХ СВЯЗЕЙ В УСИЛИТЕЛЯХ





«ЭНЕРГИЯ»
МОСКВА 1976

6Ф2
В 67
УДК 621.375.1

МИХАИЛ ЛАЗАРЕВИЧ ВОЛИН

Подавление внешних паразитных связей в усилителях

Редактор А. Б Трушля
Редактор издательства Р. М. Малинин
Обложка художника А. А. Иванова
Технический редактор Н. А. Галанчева
Корректор О. В. Корьева

Сдано в набор 19/V 1976 г. Подписано к печати 7/IX 1976 г.
Т-15126 Формат 84×108 1/32 Бумага типографская № 2
Усл. печ. л. 2,94 Уч.-изд. л. 3,94 Тираж 30 000 экз.
Зак. 671 Цена 17 коп.

Издательство «Энергия», Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10.

Московская типография № 10 Союзполиграфпрома
при Государственном комитете Совета Министров СССР
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.
Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10.

Волин М. Л.

В 67 Подавление внешних паразитных связей в усилителях. М., «Энергия», 1976.

56 с. с ил. (Массовая радиобиблиотека. Вып. 926).

В книге рассмотрены возникающие в усилителях внешние паразитные связи и даны рекомендации по обеспечению стабильной работы усилителей. Описана методика экспериментального определения и устранения паразитных связей.
Книга рассчитана на подготовленных радиолюбителей.

В $\frac{30404-514}{051(01)-76}$ 168-76 6Ф2

ПРЕДИСЛОВИЕ

Разработку усилителей производят в два этапа: конструирование и экспериментальная доводка. Последняя почти всегда оказывается необходимой потому, что при конструировании невозможно полностью учесть паразитные связи, потери в контурах, влияние расположения деталей и соединительных проводов, разброса параметров транзисторов и других радиодеталей. Чем сложнее усилитель, чем больше в нем каскадов, чем больше его коэффициент усиления, тем сложнее экспериментальная доводка усилителя. Вместе с тем время, затрачиваемое на доводку (налаживание) уменьшается, чем больше факторов, определяющих работу усилителя, учтено при его расчете и конструировании, чем тщательнее и продуманнее его монтаж. В идеальном случае доводка усилителя может свестись к простому его испытанию. Наоборот, в неудачно сконструированном усилителе добиться удовлетворительных результатов удается только после длительного экспериментирования.

Сложность налаживания усилителя почти целиком определяется наличием в нем паразитных связей. Хорошо экранированный усилитель, в котором паразитные связи подавлены по всем возможным путям их возникновения, может быть настроен достаточно быстро. Усилитель с большим коэффициентом усиления, экранированный недостаточно или неверно, можно настраивать длительно и безрезультатно.

В предлагаемой вниманию читателей книге рассмотрены причины возникновения внешних паразитных связей в усилительных и радиоприемных устройствах, работающих на частотах до нескольких десятков мегагерц, рассказано о том, как устранить эти связи с помощью фильтрующих цепей и экранов рациональной конструкции, а также даны рекомендации по конструированию широкополосных усилителей и описана методика экспериментального подавления паразитных связей.

Отзывы по книге просим присылать по адресу: 113114, Москва, М-114, Шлюзовая набережная, 10, издательство «Энергия», редакция Массовой радиобиблиотеки.

1. ВЛИЯНИЕ ПАРАЗИТНЫХ СВЯЗЕЙ НА РАБОТУ УСИЛИТЕЛЕЙ

Под паразитной наводкой понимают передачу напряжения и тока из одной части радиоэлектронного устройства в другую или извне, не предусмотренную его схемой и конструкцией. Наводка возникает вследствие паразитной связи по электрическим цепям, образующимся в устройстве помимо желания его конструктора. Нередко паразитные наводки с выхода усилителя на его вход приводят к самовозбуждению усилителя и к изменению его параметров.

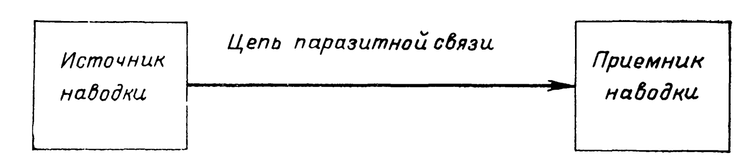


Рис. 1. Схема прохождения наводки.

При рассмотрении действия паразитных наводок приходится иметь дело с тремя функциональными элементами (рис. 1): источником наводимого напряжения; приемником наводимого напряжения; цепью паразитной связи между ними.

Чем больше уровень мощности источников наводки и чем выше входная чувствительность приемника наводки, тем вероятнее, что мелкие ошибки и упущения в конструкции и монтаже радиоэлектронного устройства приведут к возникновению наводок, нарушающих его нормальную работу.

При рассмотрении вопросов, связанных с паразитными наводками, необходимо учитывать, что наводимые напряжения и токи подчиняются общим законам электротехники, без каких-либо отклонений. Появляющиеся при этом трудности вызываются тем, что паразитные связи возникают между самыми различными частями устройства.

Паразитные связи в усилителях разбиваются на три группы.

К первой группе относятся связи, возникающие через усилительный прибор; их называют внутренними паразитными обратными связями. Влияние этих связей на работу усилителя зависит от проходной проводимости или емкости коллекторного перехода биполярного транзистора, емкости затвор-сток полевого транзистора или емкости управляющая сетка-анод электронной лампы, входной проводимости усилительного прибора, его коэффициента усиления по напряжению и полного сопротивления в цепи входного

электрода. Подробный анализ внутренних паразитных обратных связей не входит в задачу настоящей книги; с ним можно познакомиться в работе [1].

Ко второй группе относят внешние паразитные обратные связи, возникающие вследствие несовершенного экранирования и развязывания отдельных каскадов усилителя. Каждый последующий каскад усилителя может влиять на предыдущие по различным цепям паразитной связи, совместное действие которых приводит к ненормальной работе усилителя. На одних частотах напряжение, наводимое по паразитным цепям на вход усилителя, находится в фазе с подаваемым извне, что увеличивает коэффициент усиления — действует положительная обратная связь. На других частотах наводимое напряжение находится в противофазе с подаваемым извне, что уменьшает усиление — действует отрицательная обратная связь.

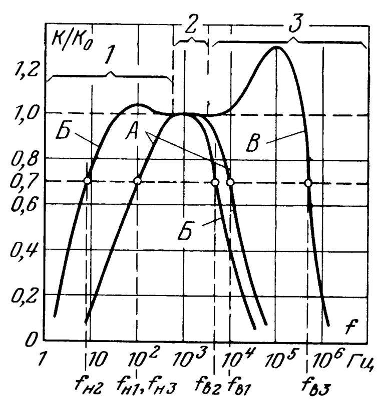


Рис. 2. Искажение амплитудно-частотной характеристики усилителя низкой частоты.

1 — область нижних частот; *2* — область средних частот; *3* — область верхних частот.

На рис. 2, для примера, показано в утрированном виде изменение амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) усилителя НЧ, вызванное паразитной обратной связью. По оси ординат отложено отношение коэффициента усиления K на данной частоте f к коэффициенту усиления K_0 в области средних частот, а по оси абсцисс — частота f. Кривая *А* представляет собой характеристику, снятую при отсутствии паразитной обратной связи, при этом граничные частоты, отсчитываемые на уровне 0,7, будут: нижняя $f_{н1}=100$ Гц, верхняя $f_{в1}=10$ кГц. Кривая *Б* соответствует наличию положительной обратной связи в области нижних частот, вследствие действия которой нижняя граничная частота снижается до значения $f_{н2}=8$ Гц, и отрицательной обратной связи в области верхних частот, вызывающей снижение верхней границы до $f_{в2}=5$ кГц. Кривая *В* иллюстрирует влияние положительной обратной связи в области верхних частот, приводящей к повышению верхней граничной частоты до значения $f_{в3}=0,5$ МГц.

К третьей группе относят внешние паразитные связи с источниками наводки, находящимися вне усилителя. Они приводят к тому, что на полезные сигналы, получающиеся на выходе усилителя, накладываются различного вида помехи. Так, например, паразитная связь основных цепей усилителя с входящими в него проводами питающей электросети является причиной появления в громкоговорителе щелчков при любых включениях и выключениях в сети. В телевизоре очень вредной является паразитная связь усилителей с генераторами развертки; она приводит к накладыванию на звук фона.

2. ЦЕПИ ПАРАЗИТНОЙ СВЯЗИ

Источник электромагнитной энергии (например, последний каскад усилителя) может быть связан с приемником этой энергии (например, первым каскадом усилителя) через соединительные провода, через электрическое, магнитное и электромагнитное поля.

Напряженность ближних электрического и магнитного полей в свободном пространстве обратно пропорциональна квадрату расстояния от элемента, возбуждающего поле. Напряженность электромагнитного поля излучения обратно пропорциональна первой степени расстояния. Напряжение на конце проводной линии или волновода с увеличением расстояния уменьшается очень медленно, за исключением случая стоячих волн в линии, когда небольшие изменения расстояния могут приводить к значительному увеличению или уменьшению напряжения. Из этой зависимости различных видов связи от расстояния между источником и приемником наводки следует, что при малых расстояниях действуют все четыре вида связи, с увеличением расстояния исчезают связи через ближние электрическое и магнитное поля, потом перестает влиять электромагнитное поле; на большом расстоянии влияет только связь по проводам и волноводам. Известны следующие виды паразитной связи.

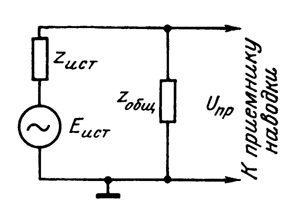


Рис. 3. Схема паразитной связи через общее сопротивление.

Паразитная связь через общее полное сопротивление $z_{общ}$, т. е. сопротивление, входящее как в цепь источника, так и в цепь приемника наводки, относится к виду связей, возникающих через соединительные провода. Источник э. д. с. наводки $E_{ист}$ (рис. 3), обладающей внутренним сопротивлением $z_{ист}$, подключен к сопротивлению $z_{общ}$; через него протекает ток величиной

$$I_{ист} = \frac{E_{ист}}{z_{ист} + z_{общ}};$$

падение напряжения на нем

$$U_{пр} = \frac{E_{ист} z_{общ}}{z_{ист} + z_{общ}}$$

и является входным напряжением приемника наводки.

Под коэффициентом паразитной связи понимают отношение $\beta = U_{пр}/E_{ист}$, показывающее, какая часть э. д. с. источника наводки попадает на приемник наводки. Из последнего выражения следует, что

$$\beta = \frac{z_{общ}}{z_{ист} + z_{общ}} \approx \frac{z_{общ}}{z_{ист}}.$$

Пренебрежение, сделанное во второй части этой формулы, допустимо, когда $z_{общ}$ мало, а выходное сопротивление источника $z_{ист}$ велико, что соответствует большей части практических случаев. Так, например, если $z_{ист} = 1$ кОм, а $z_{общ} = 1$ Ом, то $\beta = 0{,}001$. Как показано ниже, малое значение β еще не говорит о том, что данная связь несущественна.

Паразитная емкостная связь относится к числу связей, возникающих через электрическое поле. Радиоэлектронный прибор обычно имеет металлический корпус, шасси или разветвленную шину, к которым присоединены непосредственно или через блокировочные конденсаторы все общие точки деталей усилителя. При этом значение переменного напряжения каждой точки прибора можно отсчитывать относительно его корпуса.

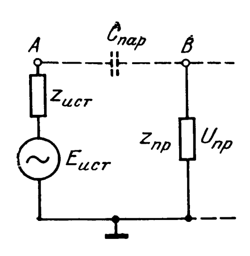


Рис. 4. Схема емкостной паразитной связи.

Если напряжение некоторой точки A (рис. 4) имеет значение $E_{ист}$ относительно корпуса, то в точке B, связанной с точкой A паразитной емкостью $C_{пар}$, возникает наведенное напряжение $U_{пр}$, величина которого определяется отношением емкостного сопротивления $X_{пар}=1/j\omega C_{пар}$ и полного сопротивления $z_{пр}$ между точкой B и корпусом. Значение $U_{пр}$ определяется выражением

$$U_{пр}=E_{ист}\frac{z_{пр}}{z_{пр}+X_{пар}},$$

из которого следует, что напряжение, наведенное в точке B, тем больше, чем меньше $X_{пар}$ и чем больше входное сопротивление приемника наводки $z_{пр}$.

Из последнего выражения следует, что коэффициент паразитной емкостной связи

$$\beta=\frac{U_{пр}}{E_{ист}}=\frac{z_{пр}}{z_{пр}+X_{пар}}\approx\frac{z_{пр}}{X_{пар}}=\omega C_{пар}z_{пр}.$$

Влияние паразитной емкостной связи тем больше, чем выше рабочая частота усилителя. Так, например, если $Z_{пр}=1$ кОм и $C_{пар}=1$ пФ, то на высшей граничной частоте усилителя НЧ, равной 10 кГц, коэффициент паразитной связи

$$\beta=\omega C_{пар}z_{пр}=2\pi 10^{4}\cdot 10^{12}\cdot 10^{3}=6,3\cdot 10^{5}=0,0063\%,$$

т. е. весьма мал. В видеоусилителе высшая частота достигает 10 МГц и коэффициент паразитной связи увеличивается в 1000 раз, т. е. до значения $\beta=6,3\%$.

Паразитная индуктивная связь относится к виду связей, возникающих через магнитное поле. В пространстве, окружающем любую цепь, по которой протекает электрический ток, возникает постоянное или переменное магнитное поле (в соответствии с видом тока).

Рис. 5. Схема индуктивной паразитной связи.

Постоянное магнитное поле не вызывает э. д. с. в находящихся в этом поле проводниках, а переменное возбуждает в них переменную э. д. с., величина которой с повышением частоты растет. Если такой проводник является частью за-

мкнутой электрической цепи, то возникшая в нем э. д. с. создает в цепи переменный ток такого направления, что вызванное им магнитное поле направлено навстречу первоначальному полю, стремясь его уничтожить.

Под действием э. д. с. источника наводки $E_{ист}$ в цепи A (рис. 5) проходит переменный ток $I_A = E_{ист}/z_A$, где z_A — полное сопротивление этой цепи. Она индуктивно связана с цепью приемника наводки B паразитной взаимоиндуктивностью $M_{пар}$. Проходящий в цепи A ток возбуждает в цепи B э. д. с.

$$E'_{ист} = I_A \omega M_{пар} = E_{ист} \omega M_{пар}/z_A,$$

под действием которой протекает ток

$$I_B = E'_{ист}/z_B = E_{ист}\, \omega\, M_{пар}/z_A\, z_B,$$

где z_B — полное сопротивление цепи B.

Протекая через входное сопротивление приемника наводки $z_{пр}$, этот ток создает на нем напряжение

$$U_{пр} = I_B z_{пр} = E_{ист}\, \omega\, M_{пар} z_{пр}/z_A\, z_B.$$

Отсюда следует, что коэффициент индуктивной паразитной связи

$$\beta = U_{пр}/E_{ист} = \omega M_{пар} z_{пр}/z_A\, z_B.$$

Таким образом, паразитная индуктивная связь проявляется тем сильнее, чем выше частота, чем больше паразитная взаимоиндуктивность, чем больше входное сопротивление приемника наводки и чем меньше полные сопротивления связывающихся цепей.

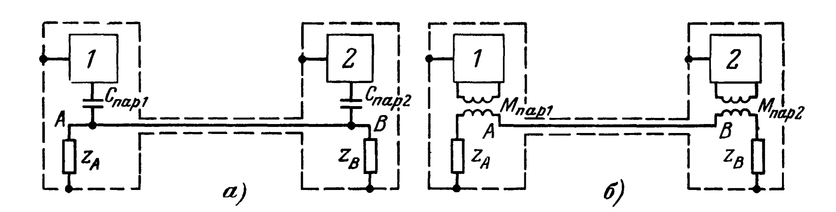


Рис. 6. Паразитные связи по «постороннему» проводу.
1 — источник наводки; 2 — приемник наводки.

Емкостная и индуктивная паразитные связи по «посторонним» проводам могут возникать и в отсутствие непосредственной связи между источником и приемником наводки. Рассмотрим случай, когда источник и приемник наводки размещены в отдельных экранированных отсеках, находящихся на большом расстоянии друг от друга (рис. 6), и через отсеки проходит провод AB. Этот провод имеет емкость $C_{пар1}$ (рис. 6,*а*) или взаимоиндукцию $M_{пар1}$ (рис. 6,*б*) по отношению к источнику наводки и емкость $C_{пар2}$ или взаимоиндукцию $M_{пар2}$ по отношению к приемнику наводки.

Очевидно, что из-за наличия провода AB оба элемента оказываются связанными емкостной, индуктивной или смешанной индуктивной-емкостной связью. Ее величина определяется как величинами $C_{пар1}$, $C_{пар2}$, $M_{пар1}$ и $M_{пар2}$, так и полным сопротивлением z_{AB}, которое имеет посторонний провод относительно корпуса. Из эквивалентной схемы для случая емкостной связи (рис. 7) видно, что комбинация паразитной емкости $C_{пар1}$ и сопротивления z_{AB} представляет собой делитель, параметры которого определяют значение напряжения, наводимого через емкость $C_{пар2}$ на приемник. Подобные же эквивалентные схемы можно составить для индуктивной и смешанной связей.

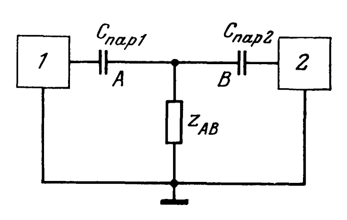


Рис. 7. Эквивалентная схема емкостной паразитной связи по «постороннему» проводу.

1 — источник наводки; *2* — приемник наводки.

Паразитная связь через электромагнитное поле излучения имеет место при значительном расстоянии между источником и приемником наводки, т. е. когда емкостная и индуктивная связи между ними практически отсутствуют. Такими считают расстояние больше 10—20 длин волн, т. е. для волны длиной 1 м расстояние больше 10—20 м, для волны 10 м — больше 100—200 м и для волны 100 м — больше 1—2 км. Паразитная связь через электромагнитное поле излучения может приводить к наводкам от соседних радиостанций, грозовых разрядов и источников промышленных помех.

На усилители этот вид наводок обычно не влияет, если вход усилителя не имеет непосредственной связи с какой-либо системой проводов, могущей служить «приемной антенной» для помех, поступающих издалека; отсутствует также детектор, необходимый для преобразования высокочастотных помех на входе усилителя в низкочастотные напряжения. Однако наводки с участием электромагнитного излучения иногда наблюдаются и в усилителях. Для этого бывает достаточно проложить посторонний провод или провода питающей электросети вблизи входных цепей усилителя. Детектирование может возникнуть в усилительном приборе за счет нелинейности его вольт-амперных характеристик. Чаще такая паразитная связь наблюдается в радиоприемниках.

В пределах усилителя паразитная наводка через электромагнитное поле излучения может возникнуть только на волнах, длины которых меньше размеров корпуса прибора. В этих условиях металлический кожух можно рассматривать как отрезок прямоугольного волновода, в котором могут распространяться волны различных типов. Наиболее опасной из них является волна типа H_{01}, наибольшая критическая длина которой $\lambda_{кр}=2b$, где b — размер большей стороны поперечного сечения прямоугольного волновода.

Волны короче критической свободно распространяются в волноводе с затуханием менее 1%/м.

Следовательно, если в пределах корпуса устройства имеются источники и приемники наводки, работающие на волнах, длины которых короче удвоенной длины наибольшей стороны корпуса, то между ними возможна связь через электромагнитное поле излучения. Этот же вид паразитной связи возможен и между частями устрой-

ства, расположенными в различных блоках или отсеках, если они соединены волноводами.

Волны длиннее критической в волноводе распространяться не могут, и в нем возникает только поле, наблюдаемое в непосредственной близости от источника и быстро затухающее по мере удаления от него. Несмотря на это, некоторые авторы рассматривают паразитные связи, возникающие в широкополосных усилителях, на основе теории волноводов, что приводит к результатам, не отражающим действительность. Более подробно этот вопрос освещен в работе [1].

3. КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ИСТОЧНИКОВ И ПРИЕМНИКОВ НАВОДКИ

Четко разграничить источники и приемники наводки в радиотехнических устройствах нельзя. Нередко одна и та же часть устройства является одновременно и источником и приемником наводки. Так, например, промежуточный каскад многокаскадного усилителя является источником наводки для предыдущих каскадов и приемником наводки от последующих. Поэтому на первом этапе проектирования усилителя можно считать все его элементы потенциальными источниками и приемниками наводки.

Чем больше различаются уровни мощностей и напряжений, имеющихся в каких-либо частях устройства, тем вероятнее наводка с одной из этих частей на другую. При одинаковых коэффициентах связи на резонансных контурах, работающих на основной частоте, возбуждается большее напряжение, чем на апериодических или расстроенных цепях. Поэтому из всех элементов радиоустройства наиболее вероятными источниками наводки являются цепи, в которых имеются максимальные уровни мощности. Наиболее вероятные приемники наводки отличаются минимальными уровнями мощности и наличием резонансных контуров, настроенных на частоты, излучаемые вероятными источниками наводки.

Кроме наводки на основной частоте изредка встречается высокочастотная наводка на гармониках. Она возникает в устройствах, содержащих элементы, работающие на кратных частотах. Если данный элемент имеет относительно высокий уровень мощности и работает в нелинейном режиме, то получающиеся на его выходе гармоники основной частоты могут по цепям паразитной связи попасть на вход любого чувствительного элемента, настроенного на кратную частоту.

Высокочастотная наводка на гармониках имеет место, например, на радиостанциях с совмещенным расположением нескольких радиопередатчиков и радиоприемников, работающих на различных частотах. На такой станции прием на частотах, равных гармоникам основных частот передатчиков невозможен.

Высокочастотная наводка на гармониках возникает также в диапазонном супергетеродинном приемнике с большим усилением по высокой и промежуточной частотам. В этих приемниках принимают меры для ослабления паразитных связей отдельно в усилителях высокой и промежуточной частот во избежание их неустойчивой работы. Однако не всегда принимают меры по ослаблению связей выхода усилителя промежуточной частоты со входом усилителя высокой частоты и с антенной, считая, что такая система работает на

двух различных частотах и обратная связь безопасна. Иногда же выходной каскад усилителя промежуточной частоты и детектор, работающие в нелинейном режиме, создают достаточно мощные гармоники промежуточной частоты, попадающие на вход приемника. При настройке усилителя высокой частоты на эти гармоники приемник в целом самовозбуждается или искажается его АЧХ.

Любые устройства, в цепях которых возникают резкие скачки постоянного напряжения или тока, могут вызывать по цепям паразитной связи наводку на элементы, содержащие резонансные контуры. Физический смысл этого явления, которое называют ударным возбуждением или «звоном», заключается в заряде и разряде емкости резонансного контура, который имеет характер затухающего колебательного процесса.

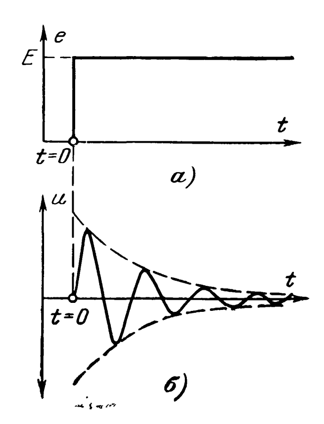


Рис. 8. Ударное возбуждение одиночного резонансного контура.

а — скачок постоянного напряжения; б — вызванный скачком затухающий колебательный процесс.

Если скачок постоянного напряжения или тока возникает в одиночном резонансном контуре, то он возбуждает этот контур на его собственной частоте (рис. 8). Каждому скачку напряжения или тока в контуре соответствует один высокочастотный затухающий импульс. Расчет амплитуды и длительности этого импульса может быть выполнен по известным формулам, описывающим свободные колебания в резонансном контуре.

Помехи от ударного возбуждения контура обычно обнаруживаются в многокаскадных приемниках, резонансных и полосовых усилителях с большими коэффициентами усиления, достаточными для доведения малых мощностей, получающихся на входе усилителя, до значений, создающих заметное мешающее действие. В таких усилителях обычно имеется большое число резонансных контуров, связанных и не связанных друг с другом, которые настроены на одну или на несколько различных частот.

Простейший анализ свободных колебаний в одиночном контуре не применим к разбору ударного возбуждения в многокаскадном усилителе. Здесь этот процесс значительно сложнее и для анализа его удобнее пользоваться спектральным методом, сущность которого заключается в следующем. На вход приемника наводки поступает от источника наводки скачок э. д. с. E (рис. 9,*а*). С помощью методов интеграла Фурье этот скачок можно представить в виде постоянного напряжения $E/2$, которое через приемник наводки не проходит, и суммы синусоидальных напряжений всех частот от $\omega=0$ до $\omega=\infty$. Бесконечно малые амплитуды этих напряжений

$$A_{\text{вх}} d\omega = E d\omega / \pi\omega,$$

составляющие «непрерывный спектр скачка» (рис. 9,*б*), обратно пропорциональны частоте ω.

Спектральный метод позволяет заменить анализ процесса ударного возбуждения, происходящего в сложной системе приемника на-

водки (рис. 9,*в*) при подаче на его вход скачка напряжения (рис. 9,*а*), анализом прохождения через приемник наводки напряжений всех частот непрерывного спектра (рис. 9,*б*).

Очевидно, что напряжения разных частот непрерывного спектра проходят через приемник наводки неодинаково, что определяется его амплитудно-частотной характеристикой. Характеристики на графике рис. 9,*в* соответствуют двум случаям: *А* — приемником наводки

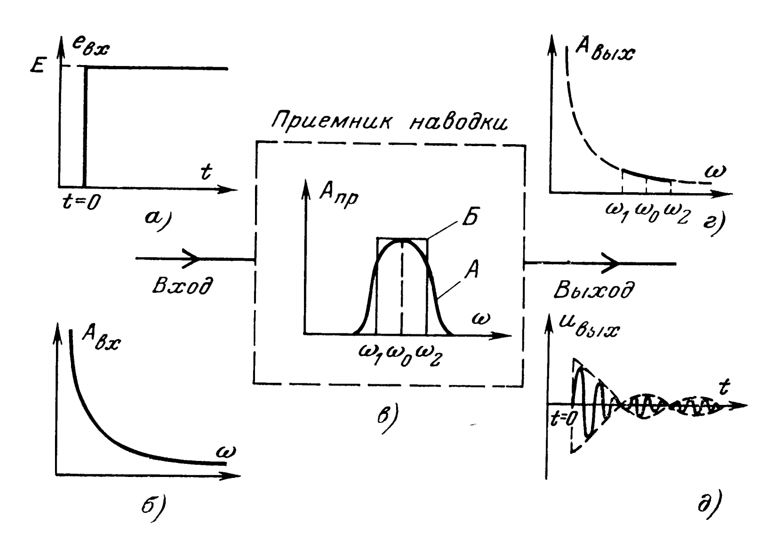


Рис. 9. Прохождение скачка напряжения через приемник наводки.

а — скачок напряжения; *б* — частотный спектр скачка; *в* — АЧХ приемника наводки; *г* — частотный спектр на выходе приемника; *д* — «отклик».

является многокаскадный усилитель ВЧ с контурами, настроенными в резонанс на частоту ω_0; *Б* — приемником наводки является идеальный широкополосный усилитель, т. е. усилитель, пропускающий одинаково сигналы с частотами от ω_1 до ω_2 и подавляющий все остальные.

Результирующий спектр на выходе приемника наводки определяется произведением функций, показанных на графиках рис. 9,*б* и 9,*в*. Для широкополосного усилителя с идеальной АЧХ этот спектр показан на рис. 9,*г* сплошной линией.

Чтобы найти форму и значение напряжения на выходе, являющегося откликом приемника наводки на поступающий на его вход скачок постоянного напряжения, достаточно просуммировать все составляющие выходного спектра. В результате такого интегрирования получается, что на выходе идеального приемника наводки, пропускающего полосу частот ω_2—ω_1, возникают затухающие высокочастотные колебания (рис. 9,*д*). Несущая частота этого отклика

равна средней частоте полосы пропускания усилителя $\omega_0 = (\omega_1 + \omega_2)/2$. Максимальная амплитуда выходного напряжения (т. е. в первом периоде колебательного процесса)

$$U_{\text{вых макс}} = E \frac{K_0 (\omega_2 - \omega_1)}{\pi \omega_0}$$

пропорциональна напряжению скачка. В остальном она зависит от параметров приемника наводки и имеет тем большую величину, чем больше его коэффициент усиления K_0, чем шире полоса пропускания $\omega_2 - \omega_1$ и чем ниже средняя частота полосы пропускания ω_0.

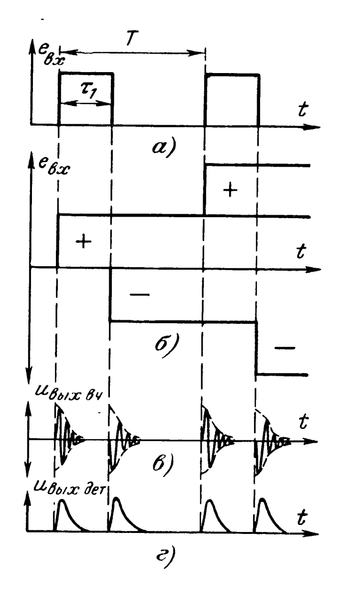


Рис. 10. Наводка на усилитель высокой частоты, создаваемая видеоимпульсами.

Спектр колебаний, проходящих через приемник наводки с реальной АЧХ, строго не ограничен частотами ω_1 и ω_2. Частоты, выходящие за пределы полосы пропускания, также проходят с постепенным снижением амплитуды по мере удаления от средней частоты. Это приводит к отсутствию четко выраженных минимумов на графике рис. 9,*д* и, следовательно, к стиранию границ между отдельными импульсами затухающей серии. Чем больше АЧХ приемника наводки отличается от идеальной, тем сильнее проявляется это сглаживание. В частности, для часто применяемых усилителей с АЧХ колоколообразного вида (кривая *А* на рис. 9,*в*) серия импульсов переходит в один импульс с растянутым срезом (рис. 10,*в*).

Таким образом, любое включение и выключение постоянного напряжения вызывает в окружающем приемник наводки пространстве помеху с непрерывным спектром. Воздействуя на приемник наводки, эта помеха проявляется в виде серии импульсов, часто сливающихся в один. Уровень импульсной помехи тем больше, чем на более низкой частоте она наблюдается.

Иногда пользуются термином «искровая помеха», т. е. роль источника импульсных помех приписывают искре. Действительно, искра часто сопровождает включение и особенно выключение цепи, являясь частным признаком наличия скачков напряжения или тока и, следовательно, импульсных помех. Однако если замыкать и размыкать цепь безыскровым выключателем, то при прочих равных условиях уровень помехи будет таким же, как и при наличии искры. Поэтому термин «искровая помеха», основанный на неверном физическом представлении, применять не следует.

Поступающую на вход резонансного усилителя непрерывную последовательность прямоугольных видеоимпульсов длительностью τ_1 с периодом следования *T* (рис. 10,*а*) можно рассматривать как сумму положительных (включение) и отрицательных (выключение) скачков напряжения, возникающих в моменты, соответствующие фронту и срезу наводимых импульсов (рис. 10,*б*). В результате каждого

скачка возникает серия затухающих импульсов или один импульс с растянутым срезом. Если длительности наводимых видеоимпульсов и интервалов между ними таковы, что процесс, вызванный предыдущим скачком, успевает полностью затухнуть к моменту посылки следующего скачка, то суммарное напряжение помехи на выходе приемника наводки представит собой непрерывную последовательность затухающих импульсов, повторяющихся через промежутки времени τ_1 и $T-\tau_1$ (рис. 10,*в*). После амплитудного детектора, которым обычно заканчивается усилитель высокой частоты, наблюдаются наведенные укороченные видеоимпульсы (рис. 10,*г*).

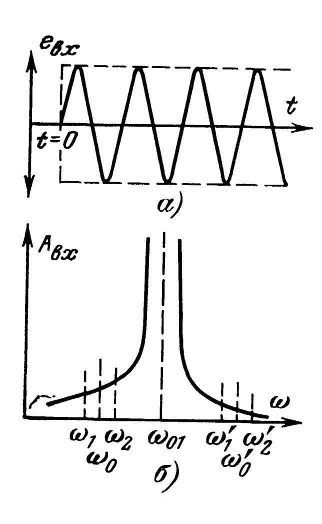


Рис. 11. Скачок переменного напряжения (*а*) и его частотный спектр (*б*).

Уменьшение длительности наводимых видеоимпульсов τ_1 и промежутка между ними $T-\tau_1$ приводит к тому, что ударное возбуждение приемника наводки, вызванное каждым следующим скачком, начинается тогда, когда возбуждение от предыдущего скачка или нескольких скачков еще не закончилось. В результате показанные на рис. 10,*в* отдельные высокочастотные импульсы помехи накладываются друг на друга, происходит их суммирование. В итоге сложная форма напряжения помехи на выходе усилителя зависит от значений τ_1 и $T-\tau_1$.

Скачки, получающиеся при включении или выключении высокочастотного напряжения или тока, также могут создавать наводку на усилитель высокой частоты.

Пусть на вход приемника поступает скачок переменной э. д. с. (рис. 11,*а*), описываемый соотношениями:

$$e_{вх}=0 \text{ для } t<0;$$

$$e_{вх}=E\sin\omega_{01}t \text{ для } t>0.$$

Такой скачок эквивалентен модуляции колебаний несущей частоты $E\sin\omega_{01}t$ скачком постоянного напряжения (рис. 9,*а*), спектр которого показан на рис. 9,*б*. Модуляция колебаний несущей частоты ω_{01} источника наводки всеми колебаниями этого спектра приводит к появлению боковых частот, симметрично расположенных относительно частоты ω_{01} (рис. 11,*б*). В отличие от спектра скачка постоянного напряжения в непрерывном спектре скачка переменного напряжения бесконечно малые амплитуды составляющих колебаний уменьшаются по мере удаления от основной несущей частоты ω_{01} в обе стороны.

Если колебания этого спектра поступают на усилитель, настроенный на частоту ω_0 и пропускающий частоты от ω_1 до ω_2, то напряжение, получающееся на выходе усилителя, зависит от соотношения между частотами ω_0 и ω_{01}. Когда $\omega_{01}=\omega_0$ — приемник настроен на несущую частоту скачка, что соответствует нормальной (не паразит-

ной) связи между усилителем и генератором. Небольшая разница между частотами ω_{01} и ω_0 приводит к искажениям формы сигнала, проходящего через эту нормальную связь. Рассмотрение этих двух случаев выходит за рамки темы настоящей книги, однако отметим, что избирательность усилителя при подаче на него скачков напряжения (импульсов) значительно хуже избирательности, определяемой при подаче непрерывного сигнала. Амплитудно-частотная характеристика радиоприемника или резонансного усилителя, снимаемая при подаче на его вход импульсов на различных несущих частотах ω_{01}, зависит от суммарного действия всех составляющих колебаний спектра сигнала, попадающих в пределы полосы частот, пропускаемых усилителем. Вид АЧХ зависит от формы, длительности и частоты импульсов.

Паразитные наводки от скачка высокочастотного напряжения возможны при большой разнице между частотами ω_{01} и ω_0, если приемник наводки настроен на значительно более высокую ($\omega_0 \gg \omega_{01}$) или значительно более низкую ($\omega_0 \ll \omega_{01}$) частоту, чем источник наводки. При этом качественно результаты аналогичны результатам, полученным для скачка постоянного напряжения, что следует из сравнения рис. 9 и 11. Если наводка представляет собой высокочастотные импульсы, то на выходе приемника наводки также получаются серии затухающих импульсов или импульсы с растянутым срезом, в зависимости от формы АЧХ приемника наводки.

Количественный анализ этого явления показывает, что скачок переменного напряжения создает значительно меньшую наводку, чем скачок постоянного напряжения. Вследствие этого прямая наводка высокочастотных импульсов встречается крайне редко. Значительно опаснее наводка высокочастотных импульсов, если происходит преобразование их в видеоимпульсы в каком-либо нелинейном элементе приемника наводки. Дальнейшее их прохождение соответствует графикам на рис. 9 и 10. Подробнее см. работу [1].

4. ОЦЕНКА НЕОБХОДИМОЙ СТЕПЕНИ ПОДАВЛЕНИЯ ПАРАЗИТНЫХ СВЯЗЕЙ

В многокаскадных усилителях существует большое число каналов, по которым усиленное напряжение может поступать из цепей с бóльшими уровнями в цепи с меньшими уровнями сигналов. Такими каналами являются все цепи паразитной обратной связи между выходной и входной цепями в пределах каждого каскада, в пределах двух, трех и большего числа каскадов и, наконец, связь выхода усилителя с его входом.

Наличие большого числа каналов паразитной связи не позволяет произвести теоретическое рассмотрение явления в общем виде. Для упрощения предположим, что обратные связи имеются только между выходом и входом усилителя. Этому предположению соответствует однокаскадный усилитель, а из многокаскадных только те, в которых экранирование выполнено настолько хорошо, что с влиянием связей между промежуточными цепями можно не считаться. При неудачном экранировании может оказаться, что значимость цепей связи между промежуточными каскадами усилителя велика. Определим условия устойчивой работы усилителя, полагая, что наличием этих связей можно пренебречь.

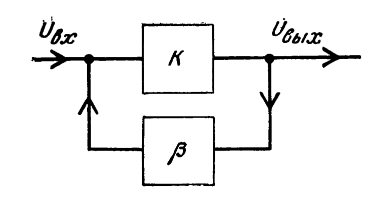


Рис. 12. Функциональная схема усилителя с обратной связью.

На рис. 12 показана функциональная схема усилителя с обратной связью. Коэффициент усиления усилителя без обратной связи равен K. По цепи обратной связи поступает на вход усилителя часть его выходного напряжения β. В общем случае коэффициенты K и β являются комплексными величинами, модули и фазовые углы которых зависят от частоты.

Если на вход усилителя подать напряжение $U_{вх}$, то выходное напряжение $U_{вых}$ определяется усиленным в K раз напряжением входа и выходным напряжением, которое ослабится в β раз и усилится в K раз. Отсюда

$$U_{вых} = KU_{вх} + \beta KU_{вых}.$$

Решая это уравнение относительно $U_{вых}$, получаем:

$$U_{вых} = KU_{вх}\ (1 - \beta K),$$

откуда коэффициент усиления усилителя с обратной связью

$$K_{о.с} = U_{вых}/U_{вх} = K/(1 - \beta K).$$

Если $|1-\beta K|<1$ — усиление возрастает; в этом случае обратная связь называется *положительной*. Если же абсолютное значение знаменателя $|1-\beta K|>1$, то имеет место *отрицательная* обратная связь, уменьшающая усиление.

Во всей рабочей полосе частот многокаскадного усилителя невозможно обеспечить только один из этих видов обратной связи и поэтому нельзя полностью добиться преимуществ, даваемых отрицательной обратной связью. Дело в том, что модуль и фазовый угол произведения βK зависят от частоты; они настолько изменяются в пределах полосы частот, пропускаемых усилителем, что на некоторых частотах получается положительная обратная связь, а на других — отрицательная.

Для получения неискаженной АЧХ усилителя с паразитной обратной связью ее иногда корректируют при настройке, повышая каким-либо способом усиление на одних частотах или снижая на других. В резонансных усилителях чаще всего этого достигают расстройкой отдельных контуров относительно расчетных частот настройки или путем изменения сопротивления резисторов, шунтирующих контуры, а в видеоусилителях — применением корректирующих дросселей и конденсаторов. Такие искусственные приемы получения требуемой АЧХ, используемые вместо уменьшения паразитной обратной связи, ухудшают неизменность полосы пропускания при регулировании усиления, коэффициент усиления и форму АЧХ делают зависимыми от значений питающих напряжений, от смены и старения усилительных приборов. Поэтому паразитную обратную связь любого вида в усилителях следует квалифицировать как явление, подлежащее максимально возможному подавлению.

Многокаскадный усилитель с большим числом каналов паразитной обратной связи между любыми оконечными и промежуточными цепями можно представить в виде комбинации отдельных усилителей (рис. 13), состоящих из одного, двух, трех и более каскадов, в ко-

торых имеется обратная связь только между входом и выходом, характеризуемая значениями произведений

$$\beta_1 K_1;\ \beta_2 K_2,\ \ldots,\ \beta_{12} K_{12};\ \beta_{23} K_{23},\ \ldots,\ \beta K.$$

Практически напряжение с выхода усилителя на его вход может проникнуть:

а) через емкость между входной и выходной цепями усилителя. Этот вид связи имеет место в усилителе, если провода входной цепи проходят вблизи выходных (емкость $C_{\text{пар1}}$ на рис. 14), отсутствуют экранирующие перегородки между каскадами, неудачно расположе-

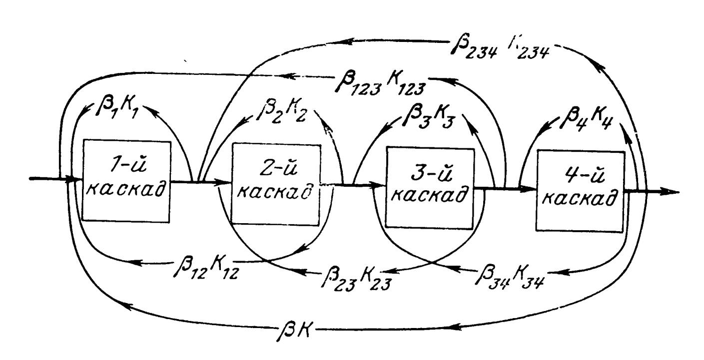


Рис. 13. Обратные связи в многокаскадном усилителе.

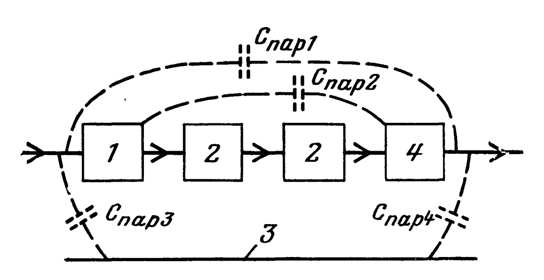


Рис. 14. Емкостные паразитные связи в многокаскадном усилителе.

1 — детали первого каскада; *2* — детали промежуточных каскадов; *3* — «посторонний» провод; *4* — детали последнего каскада.

ны транзисторы и другие детали отдельных каскадов (наличие емкости $C_{\text{пар2}}$) и, наконец, если в монтаже имеются провода, не входящие в состав высокочастотных цепей, но связанные с ними емкостями $C_{\text{пар3}}$ и $C_{\text{пар4}}$ (в том числе провода питания);

б) через взаимоиндуктивности между катушками контуров или трансформаторами усилителя;

в) через цепи питания усилительных приборов;

г) через цепи автоматического и ручного регулирования усиления;

д) через шасси, корпус усилителя или разветвленную корпусную шину («общий» провод).

В различных усилителях перечисленные каналы паразитных связей имеют различную значимость. В первую очередь, она определяется рабочими частотами. В усилителе, работающем на частотах выше 10 МГц, можно ожидать появления каналов внешней обратной связи всех видов. На более низких рабочих частотах связь вида «д» маловероятна, так как при увеличении отношения длины волны к линейным размерам усилителя можно с большей точностью считать, что между участками поверхности шасси разность потенциалов отсутствует. Если «корпусом» является разветвленная шина, то связь вида «д» может возникнуть даже на частотах ниже 1 МГц. На еще более низких частотах уменьшается вероятность влияния всех видов емкостных связей, включая связь по «посторонним» проводам. В многокаскадном усилителе низкой частоты вероятны только связи видов «б», «в» и «г».

Паразитные напряжения поступают на вход усилителя в различных фазах и суммируются геометрически. Учесть все эти фазовые соотношения не представляется возможным, поэтому будем рассматривать подавление внешних паразитных связей по каждой цепи отдельно.

Обсудим, какую часть выходного напряжения можно передать на вход усилителя без значительного ухудшения его параметров. В пределах полосы пропускания многокаскадного усилителя фазовый угол произведения βK изменяется значительно, и поэтому напряжение паразитной обратной связи, поступающее с выхода через цепь обратной связи β, на некоторых частотах совпадает по фазе с входным напряжением, а на других частотах находится в противофазе. В первом случае обратная связь действует как глубокая положительная, а во втором — как отрицательная. При разборе влияния на АЧХ усилителя только внутренней обратной связи считают допустимым 10%-ное изменение усиления, вызванное этой связью [1].

Внешние паразитные обратные связи не являются неизбежными, но могут быть снижены до любого уровня усложнением конструкции усилителя. При выборе допустимого значения изменения усиления, вызываемого каждой из внешних обратных связей, приходится идти на компромисс между ухудшением параметров и усложнением и удорожанием усилителя. Во избежание увеличения этих связей при случайном совпадении фаз напряжений, поступающих по различным цепям обратной связи, включая и внутреннюю, допустимое изменение усиления следует снизить до 1%. Тогда даже в наихудшем случае можно считать, что основной цепью паразитной обратной связи будет внутренняя.

Приняв этот допуск, получим, что абсолютное значение произведения βK не должно превосходить 1%, т. е. $|\beta K|<0{,}01$. Следовательно, максимально допустимое значение коэффициента передачи по каждой из цепей паразитной обратной связи $\beta_{\text{макс}}=0{,}01/K$. Следовательно, любая фильтрующая цепь, любой междукаскадный экран должен уменьшать паразитное напряжение не менее чем в $1/\beta_{\text{макс}}=100K$ раз.

Эффективность экранирования и фильтрации должна быть прямо пропорциональна коэффициенту усиления по напряжению. Чем больше отношение уровней сигналов между какими-либо цепями усилителя, тем лучше следует их экранировать друг от друга.

5. ПАРАЗИТНАЯ ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ ПО ЦЕПЯМ ПИТАНИЯ РЕЗОНАНСНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ

Цепи питания транзисторов и электронных ламп образуются источниками напряжений, проводами и элементами сглаживающих и развязывающих фильтров. Питание большинства усилителей осуществляется от одного источника напряжения $U_{пит}$ (рис. 15,*а*) *. Некоторые усилители, чаще транзисторные, питают от двух источников напряжения (рис. 15,*б*). У одного из них с корпусом соединен положительный полюс. Этот источник служит для питания коллекторных цепей транзисторов структуры *p-n-p* и эмиттеров транзисторов *n-p-n*. У другого источника с корпусом соединен отрицательный полюс; он

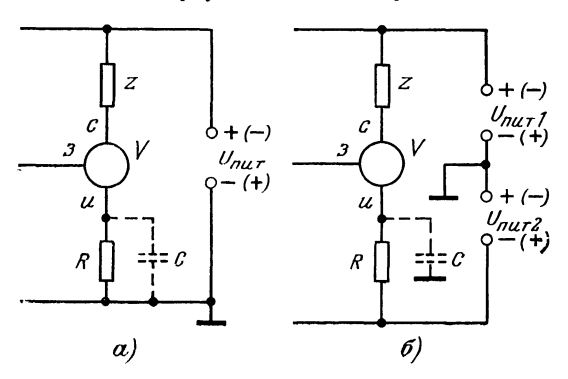


Рис. 15. Питание усилительного прибора от одного (*а*) и двух (*б*) источников.

V — усилительный прибор; *и* — исток (или эмиттер биполярного транзистора, катод электронной лампы); *з* — затвор (или база биполярного транзистора, управляющая сетка электронной лампы); *с* — сток (или коллектор биполярного транзистора, анод электронной лампы); *Z* — выходная нагрузка.

используется для питания коллекторов транзисторов структуры *n-p-n* и эмиттеров транзисторов *p-n-p*. Осуществляя питание усилителя от двух источников, можно улучшить стабильность усиления и уменьшить ток потребления усилительного устройства на биполярных транзисторах, поскольку исключается расход тока на делители напряжения, с которых подается смещение на базы. В усилителях на полевых транзисторах и лампах питание от двух источников применяют редко — только при необходимости повысить неизменность усиления в течение срока службы усилительных приборов и при их подборе или смене. Ниже разбираются вопросы фильтрации одной из основных цепей питания усилителей высоких и промежуточных частот, выполненных на усилительных приборах любого вида.

---

* В соответствии с ГОСТ 2.710-75 «Обозначения условные буквенно-цифровые, применяемые на электрических схемах» усилительным приборам (транзисторы, электронные лампы) в настоящей книге присвоен символ *V*. В тексте наряду с обобщенным термином «усилительный прибор» будем также применять краткую его форму «прибор» с добавлением буквенно-цифрового обозначения на схемах V_1, V_2 и т. д. (*Прим. ред.*)

Обратная связь через цепи питания относится к паразитной связи через общее сопротивление (см § 2). На рис. 16 приведена упрощенная схема резонансного усилителя высокой частоты. На выходные электроды (стоки) каждого усилительного прибора питание поступает через катушки индуктивности L_1, L_2, ..., L_n соответственно. (Разделительные конденсаторы и элементы стабилизации режимов транзисторов по постоянному току на этой схеме и на приводимых далее электрических схемах не показаны.) Высокочастотный ток имеет наибольшее значение в следующей цепи последнего каскада усилителя: корпус усилителя — исток — сток усилительного прибо-

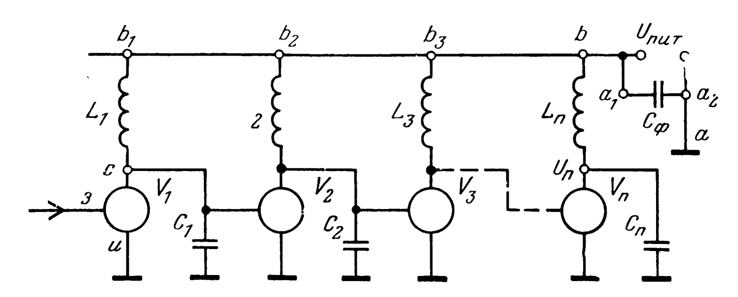


Рис. 16. Схема резонансного усилителя высокой частоты без цепей фильтрации и элементов стабилизации режимов усилительных приборов по постоянному току.

ра — контурная катушка индуктивности L_n — участок шины питания ba_1 — конденсатор фильтра питания $C_ф$ — участок провода a_2a — корпус усилителя. Этот ток I_n создает на участке цепи ab падение напряжения U_{ab}, которое оказывается приложенным к шине питания b_1, b. Емкость конденсатора $C_ф$ выбирают настолько большой, что его сопротивлением переменному току, создаваемому сигналом наиболее низкой из рабочих частот, можно пренебречь. Индуктивное сопротивление участка ab, равное ωL_{ab}, является общим сопротивлением, определяющим паразитную обратную связь. Напряжение $U_{ab} \approx I_n \omega L_{ab}$, возникающее на шине питания, поступает через контурные катушки индуктивности L_1, L_2, ..., L_{n-1} на стоки усилительных приборов всех остальных каскадов устройства, а также на затворы усилительных приборов V_2, V_3, ..., V_n.

Мы рассмотрели цепи обратной связи последнего каскада усилителя со всеми предыдущими каскадами, кроме первого. Цепи паразитной связи предпоследнего и других каскадов с предыдущими образуются аналогично. Очевидно, что из всех этих цепей наибольшее значение имеет цепь связи последнего каскада со вторым каскадом. Каскады, следующие за вторым каскадом, на первый каскад не влияют, если затвор прибора V_1 не связан непосредственно с шиной питания. Это условие иногда не выполняется, например, когда начальное смещение на затвор прибора V_1 поступает от общего источника питания. В подобных случаях приходится учитывать влияние последующих каскадов и на первый каскад усилителя.

Эквивалентная схема связи последнего каскада со вторым приведена на рис. 17. Из нее следует, что индуктивность L_{ab} входит как в резонансный контур последнего каскада L_nC_n, так и в кон-

тур L_1C_1, подключенный к стоку прибора V_2, т. е. является элементом, связывающим оба контура.

Провод ab длиной 10 см имеет индуктивность $L_{ab} \approx 0{,}1$ мкГ. В резонансных контурах усилителя применяют катушки индуктивностью около 500 мкГ для частоты $f=465$ кГц, 1 мкГ для $f=30$ МГц и 0,05 мкГ для $f=200$ МГц. При $L_{ab}=0{,}1$ мкГ коэффициент связи $k_{св}$ имеет следующие значения:

$$k_{св}=0{,}1/(500+0{,}1) \approx 0{,}02\% \text{ на частоте 465 кГц;}$$

$$k_{св}=0{,}1/(1+0{,}1) \approx 9\% \text{ на частоте 30 МГц;}$$

$$k_{св}=0{,}1/(0{,}05+0{,}1) \approx 67\% \text{ на частоте 200 МГц.}$$

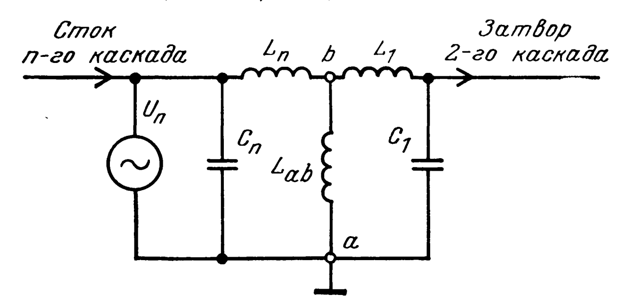


Рис. 17. Эквивалентная схема цепи паразитной обратной связи в отсутствие фильтрации.

Через такую связь между контурами значительная часть выходного напряжения усилителя U_n передается на вход второго каскада. Создавая паразитную обратную связь, участки провода ab_1, ab_2, ab_3, ..., ab вместе с тем входят в контуры усилителя (включены последовательно с индуктивностями L_1, L_2, L_3, ..., L_n), снижая устойчивость его настройки, так как являются нестабильными частями индуктивности контуров. Подключение конденсаторов C_1, C_2, ..., C_n к точкам b_1, b_2, ..., b (вместо шасси) частично улучшает устойчивость настройки и уменьшает обратную связь в узкополосном усилителе. В широкополосном же усилителе сосредоточенная емкость контура обычно мала или вовсе отсутствует, а распределенную емкость физически невозможно подключить к точкам b_1, b_2, ..., b.

Паразитную обратную связь по цепи питания подавляют с помощью развязывающих цепей (ячеек). В двухкаскадных усилителях применяют параллельную схему фильтрации (рис. 18), отличающуюся тем, что каждый каскад имеет индивидуальные развязывающие ячейки $R_{р1}C_{р1}$ и $R_{р2}C_{р2}$. Параллельно конденсатору фильтра питания $C_ф$ включают конденсатор $C_{ф.вч}$, емкость которого на рабочей частоте усилителя должна удовлетворять условию

$$1/\omega_0 C_{ф.вч} \ll \omega_0 L_{ab}.$$

В противном случае из-за резонанса цепи $C_{ф.вч}L_{ab}$ конденсатор может оказаться бесполезным и даже вредным. Исходя из этих соображений, при $L_{ab}=0{,}1$ мкГ и рабочей частоте $f=465$ кГц необходимо применять конденсатор $C_{ф.вч}$ емкостью больше 4 мкФ, при $f=10$ МГц больше 0,01 мкФ, при $f=30$ МГц больше 1000 пФ, при $f=50$ МГц — 250 пФ или не включать его вовсе.

Фильтрация улучшается при увеличении емкостей C_{p1}, C_{p2} и сопротивлений резисторов R_{p1}, R_{p2}. Однако такое увеличение вызывает необходимость повышения напряжения питания и применения резисторов с большими номинальными мощностями рассеяния.

Значения C_p и R_p могут быть выбраны произвольно, однако должны выполняться условия: $1/\omega_0 C_{p1} \ll R_{p1}$, $1/\omega_0 C_{p2} \ll R_{p2}$, а падение напряжения на резисторах должно быть возможно меньшим.

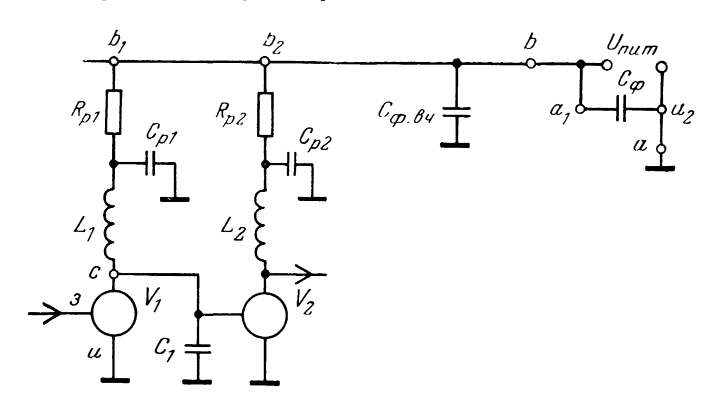


Рис. 18. Параллельная схема фильтрации цепи питания.

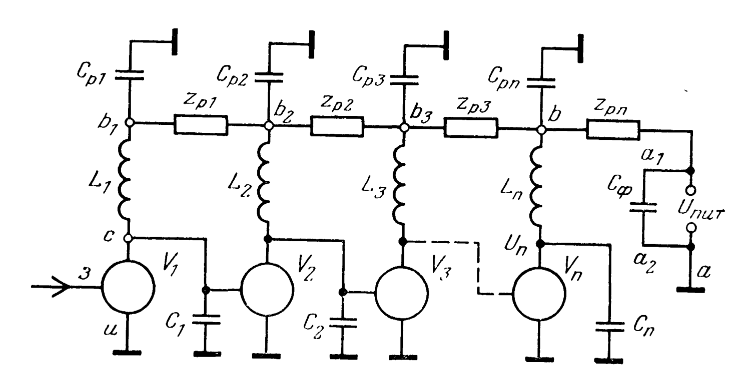


Рис. 19. Последовательная схема фильтрации цепи питания.

Применение параллельной фильтрации при числе усилительных каскадов более двух нецелесообразно, так как общее число деталей в развязывающих ячейках увеличивается, а ослабление фильтруемого напряжения не изменяется.

От указанных недостатков свободна последовательная схема фильтрации (рис. 19). Здесь проходящий вдоль всего усилителя провод питания разделен на участки развязывающими ячейками и напряжение на стоки усилительных приборов каскадов подается с промежуточных точек b_1—b. Любые наводки, возникающие в этих

точках, ослабляются так же, как и основная паразитная связь между каскадами. Фильтрующими ячейками разделены все каскады и чем дальше по схеме они отстоят друг от друга, тем лучше развязка между ними.

Через включенные последовательно в провод питания сопротивления $z_{\text{р}1}$, $z_{\text{р}2}$, ..., $z_{\text{р}n}$ протекают постоянные составляющие токов усилительных приборов.

Если большое падение напряжения на упомянутых сопротивлениях недопустимо, то вместо резисторов применяют дроссели. Поскольку постоянный ток, протекающий через ячейки, уменьшается по мере удаления от точки подключения источника питания, возможно применение комбинированной фильтрующей цепи, состоящей из одного или двух дросселей в ячейках, ближайших к точке подключения напряжения питания, и резисторов в следующих ячейках.

Сопротивление $z_{\text{р}n}$ не участвует в ослаблении передачи напряжения U_n на затвор прибора V_2, оно лишь устраняет внешние наводки, которые могут проникнуть в усилитель по проводам питания. Через это сопротивление протекает сумма токов всех усилительных приборов. Для того чтобы избежать бесполезной потери напряжения питания, в качестве этого сопротивления обычно применяют дроссель.

На рис. 16, 18 и 19 приведены схемы усилителей с одиночным резонансным контуром в каждом каскаде и с непосредственной междукаскадной связью. При междукаскадных связях иного вида (двухконтурные резонансные усилители с разделительными конденсаторами, с резисторами в цепях стока и затвора, с трансформаторами) схема включения и принцип действия фильтров в цепях питания такие же.

Если усилитель питается от двух источников (рис. 15,*б*), то фильтры в цепи второго источника выполняют так же, как и в цепи первого.

В ламповых усилителях с большим усилением, работающих на частотах выше 10 МГц, приходится вводить фильтры в цепи накала. Подробно этот вопрос освещен в работе [2].

6. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА ФИЛЬТРУЮЩИХ ЦЕПЕЙ ПИТАНИЯ РЕЗОНАНСНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ

Пример 1. Рассчитать фильтрующую цепь транзисторного широкополосного шестикаскадного усилителя, работающего на частоте $f_0=30$ МГц. Биполярные транзисторы включены по последовательной каскодной схеме *ОЭ-ОБ* и работают в режиме: $I_э=5$ мА; $U_к=4\div6{,}5$ В. Для стабилизации режима применены делители напряжения, потребляющие ток в каждом каскаде, $I_{\text{дел}}=5$ мА и эмиттерные резисторы, на которых падает часть напряжения питания (2 В). Напряжение источника питания $U_{\text{пит}}=15$ В. Усиление по напряжению на каскад $K_{u1}=7$ и всего усилителя $K_u=K^6_{u1}=125\cdot10^3$.

Расчет. Так как число каскадов больше двух, выбираем последовательную схему фильтрации (рис. 19). В качестве сопротивлений развязывающих ячеек применяем одинаковые резисторы. На рис. 20 дана эквивалентная высокочастотная схема фильтрующей цепи для числа каскадов $n=6$. Здесь высокочастотное напряжение U_6, получающееся между коллектором усилительного прибора V_6 и корпусом усилителя снижается делителем, составленным из контурной катушки L_6 и емкости $C_{\text{р}6}$, затем делителем $R_{\text{р}5}C_{\text{р}5}$ и т. д. вплоть

до делителя $R_{p1}C_{p1}$, с которого ослабленное напряжение паразитной обратной связи поступает через контур L_1C_1 на базу транзистора V_2. На каждом резисторе теряется часть постоянного напряжения питания, вследствие чего напряжение на коллекторах транзистора V_6 максимально и на коллекторе V_1 — минимально. Распределение напряжений и прохождение токов в цепях первого усили-

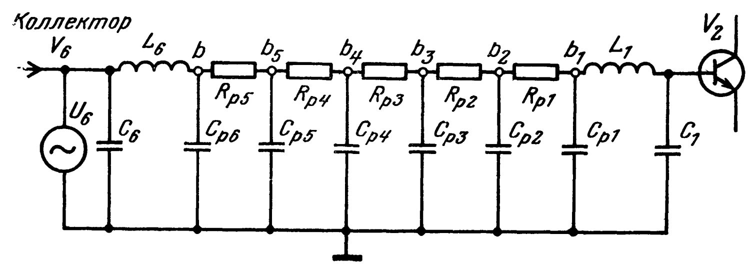


Рис. 20. Эквивалентная схема последовательной фильтрующей цепи шестикаскадного усилителя к примеру 1.

тельного каскада показано на рис. 21. Падение напряжения на всех резисторах фильтрующей цепи

$$\Delta U_{\text{пит}} = U_{\text{пит}} - 2U_{\text{К}} - U_{\text{э}} = 5 \text{ В}.$$

Ток потребления одного каскада $I = I_{\text{э}} + I_{\text{дел}} = 10$ мА и падение напряжения на всех ячейках фильтрующей цепи

$$\Delta U_{\text{пит}} = I_1R_{\text{р}} + 2I_1R_{\text{р}} + 3I_1R_{\text{р}} + 4I_1R_{\text{р}} + 5I_1R_{\text{р}} =$$

$$= 15I_1R_{\text{р}} = 5 \text{ В},$$

откуда

$$R_{\text{р}} = \Delta U_{\text{пит}}/15I_1 = 5/15 \cdot 10 \cdot 10^{-3} = 33 \text{ Ом}.$$

Максимальная мощность рассеивается на резисторе $R_{\text{р5}}$ (рис. 21); она равна $P = (5I_1)^2R_{\text{р}} = 0{,}08$ Вт.

Фильтр должен давать ослабление паразитного напряжения высокой частоты в 100 $K = 100 \cdot 7^5 = 1{,}7 \cdot 10^6$ раз, и при значении емкостей $C_{\text{р}} = 1000$ пФ, имеющих на частоте $f_0 = 30$ МГц сопротивление $X_C = 5{,}3$ Ом, каждая промежуточная ячейка будет ослаблять напряжение в $33/5{,}3 = 6{,}2$ раза. Первая ячейка фильтра при индуктивности $L_6 = 1$ мкГ, имеющей на частоте 30 МГц сопротивление $X_L = 190$ Ом, будет снижать напряжение в $190/5{,}3 = 36$ раз. Весь фильтр уменьшает напряжение наводки в $36 \cdot 6{,}2^5 = 2{,}1 \cdot 10^6$ раз, т. е. несколько больше, чем необходимо.

Напряжение питания относительно корпуса в точке b будет $U_b = 15$ В, в точке b_5 — $U_{b5} = 15 - 50 \cdot 33 \cdot 10^{-3} = 13{,}35$ В, в точке b_4 — $U_{b4} = 13{,}35 - 40 \cdot 33 \cdot 10^{-3} = 12{,}03$ В, в точке b_3 — $U_{b3} = 12{,}03 - 0{,}99 = 11{,}04$ В, в точке b_2 — $U_{b2} = 11{,}04 - 0{,}66 = 10{,}38$ В и в точке b_1 — $U_{b1} = 10{,}38 - 0{,}33 = 10{,}05$ В. Такое возрастание напряжения питания от первого каскада к последнему может быть даже полезным. Если же это повышение по каким-либо причинам неприемлемо, его легко скомпенсировать изменением сопротивлений резисторов в цепях эмиттеров.

Падение напряжения питания на фильтрующих ячейках будет меньше, если все или часть развязывающих резисторов заменить дросселями. Так как катушки индуктивности имеют распределенную емкость и собственную резонансную частоту, реактивное сопротивление любого дросселя для относительно низких частот имеет индуктивный характер и растет с повышением частоты; после того как оно принимает максимальное значение, оно становится емкостным и с повышением частоты падает. При дальнейшем повышении частоты дроссель, как и любая другая цепь с распределенными постоянными, на некоторых частотах ведет себя как последовательный резонансный контур. В этом случае сопротивление дросселя может уменьшиться до весьма малой величины и фильтрующее действие ячейки с дросселем на некоторых частотах окажется незначительным. Поэтому собственная резонансная частота дросселя $f_{\text{одр}}$ должна быть выше самой высокой из фильтруемых частот.

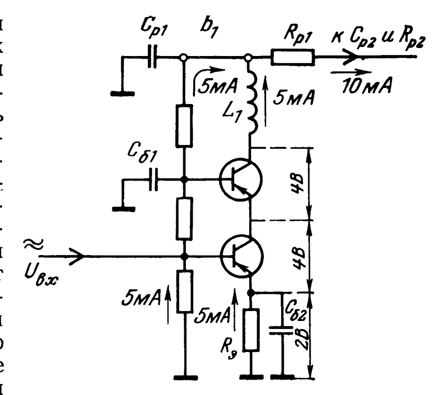


Рис. 21. Схема первого каскада усилителя к примеру 1.

В качестве высокочастотных дросселей обычно применяют однослойные катушки малого диаметра, так как они имеют малую собственную емкость. Если катушка намотана на каркасе из изоляционного материала (например, на непроволочном высокоомном резисторе), то согласно экспериментальным данным ее собственная длина волны $\lambda_{\text{одр}} \approx 3l$, где l — длина провода катушки, м. Собственная резонансная частота дросселя $f_{\text{одр}} = 100/l$ МГц.

Однослойные дроссели, наматываемые на стержни из ферритов или магнитоэлектриков при той же индуктивности имеют значительно меньшие размеры, чем дроссели без сердечника.

Для рассчитываемой нами фильтрующей цепи можно выбрать дроссель с индуктивностью 5 мкГ. Падением постоянного напряжения на нем можно пренебречь Если заменить дросселем только резистор $R_{\text{р}5}$ ($z_{\text{р}5}$ на рис. 19), то постоянные напряжения в точках b_5—b_1 возрастут на 1,65 В. Если же заменить дросселями резисторы $R_{\text{р}5}$ и $R_{\text{р}4}$, то напряжение в точке b_5 возрастет на 1,65 В, а во всех остальных на $1{,}65+1{,}32=2{,}97$ В. Заменять остальные резисторы дросселями не рационально, так как это незначительно повышает напряжения на коллекторах, а стоимость дросселя выше стоимости резистора.

Пример 2. Рассчитать фильтрующую цепь для двухкаскадного усилителя промежуточной частоты на биполярных транзисторах. На его вход поступает сигнал от преобразователя частоты по цепи связи, аналогичной цепи связи между транзисторами усилительных каскадов (см. рис. 18). Промежуточная частота $f_0=465$ кГц. Усиление каждого каскада по напряжению $K_{u1}=30$. Эквивалентное сопротивление резонансного контура, приведенное к точкам подключения источ-

ника питания, $R_э=500$ Ом. Потребляемый каскадом ток, включая ток делителя напряжения на базу, $I_{ЭБ}=10$ мА.

Расчет. Выбираем параллельную схему фильтрации. Она должна ослаблять напряжение наводки, поступающее по цепи паразитной обратной связи из цепи коллектора транзистора второго усилительного каскада в цепь базы его первого каскада (т. е. в цепь коллектора преобразователя частоты), в $100K_{u1}=100\cdot30^2=90\,000$ раз. Эквивалентная схема рассматриваемой фильтрующей цепи приведена

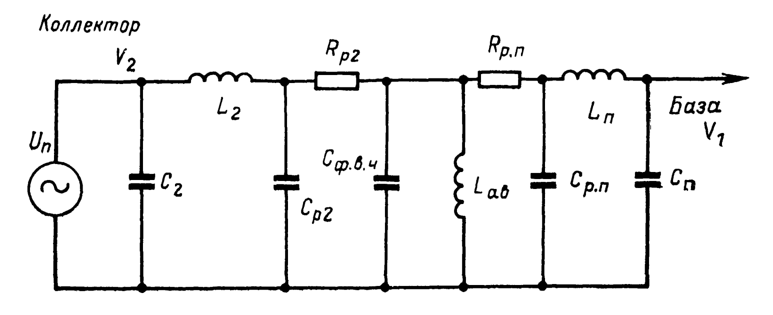


Рис. 22. Эквивалентная схема фильтрующей цепи к примеру 2.

на рис. 22; здесь: $L_п$, $C_п$ — элементы резонансного контура в цепи коллектора преобразователя частоты, $R_{р.п}$, $C_{р\ п}$ — элементы ячейки фильтра преобразователя; остальные обозначения соответствуют рис. 18.

Выбираем конденсаторы и резисторы со стандартными номиналами: $C_р=0{,}027$ мкФ, $R_р=100$ Ом (при этом потеря напряжения питания составляет 1 В). Конденсатор $C_{ф\ вч}$ не нужен (см. § 5). $L_{ab}=0{,}1$ мкГ ($X_L=0{,}3$ Ом при $f_0=465$ кГц).

Первая ячейка фильтра (считая от коллектора транзистора V_2 второго усилительного каскада), состоящая из эквивалентного сопротивления резонансного контура L_2C_2 и емкостного сопротивления $X_C=12{,}5$ Ом (конденсатор $C_{р2}$), ослабляет наводку в $500/12{,}5=40$ раз. Вторая ячейка, состоящая из резистора $R_{р2}$ и индуктивного сопротивления $X_L=0{,}3$ Ом, ослабляет наводку в $100/0{,}3=330$ раз. Третья ячейка, в которую входят резистор $R_{р.п}=100$ Ом и конденсатор $C_{р\ п}$ с емкостным сопротивлением $X_C=12{,}5$ Ом, ослабляет наводку в $100/12{,}5=8$ раз. Вся фильтрующая цепь ослабит наводку в $40\cdot330\cdot8=106\,000$ раз. Следовательно, номиналы резисторов и конденсаторов фильтрующих ячеек выбраны правильно (фильтрация будет достаточной, если даже фактические сопротивления и емкости будут с отрицательным допуском).

7. ПАРАЗИТНАЯ ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ ПО ЦЕПЯМ ПИТАНИЯ УСИЛИТЕЛЕЙ НИЗКОЙ ЧАСТОТЫ И ВИДЕОУСИЛИТЕЛЕЙ

В усилителях низкой частоты и видеоусилителях возможны два вида паразитной обратной связи по основным цепям питания. Обратная связь первого вида возникает за счет индуктивного сопротивле-

ния общего участка провода питания. Глубина этой паразитной обратной связи с повышением частоты увеличивается. Поэтому она опасна только в усилителях с весьма высокой верхней граничной частотой. Борьбу с паразитной связью в видеоусилителях на высоких частотах ведут так же, как и в резонансных усилителях — с помощью развязывающих цепей (см. § 5 и 6).

Второй вид паразитной обратной связи возникает в усилителе на низших частотах его полосы пропускания. С понижением частоты растет емкостное сопротивление выходного конденсатора фильтра питания $C_ф$ и при $f \longrightarrow 0$ сопротивление участка цепи ab достигает суммарного значения сопротивлений постоянному току дросселей фильтра и внутреннего сопротивления источника питания. На рис. 23 показано, как изменяется сопротивление общего участка провода питания, обладающего индуктивностью 0,1 мкГ, при изменении частоты от 10 Гц до 100 МГц, если внутреннее сопротивление источника питания $R_ф = 300$ Ом и $C_ф = 10$ мкФ.

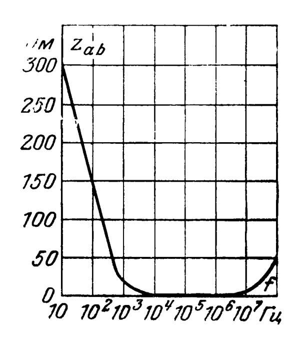


Рис. 23. Зависимость выходного сопротивления источника питания от частоты.

Увеличение емкости конденсатора $C_ф$ практически не влияет на этот вид обратной связи, так как независимо от его емкости сопротивление общего участка провода при понижении частоты всегда стремится к величине $R_ф$. Мало влияют также сопротивления развязывающих резисторов $R_р$ и емкости конденсаторов $C_р$, включаемых по схемам на рис. 18 или 19, так как фильтрующие свойства ячеек при понижении частоты ухудшаются.

Паразитная обратная связь на низших частотах искажает АЧХ усилителя или приводит к его самовозбуждению на частотах нескольких герц. Очевидно, что эти явления будут тем резче, чем больше коэффициент усиления на низших частотах. Поэтому основным методом борьбы с самовозбуждением усилителя на низших частотах является максимально возможное снижение усиления на этих частотах. Параметры усилителя следует выбирать так, чтобы усиление на частотах ниже $f_н$ снижалось как можно круче.

Глубина паразитной обратной связи определяется сопротивлением общего участка провода цепи питания, значение которого в области низших частот стремится к значению внутреннего сопротивления источника питания постоянному току $R_ф$. Поэтому любые меры снижения этого сопротивления — уменьшение сопротивления дросселя фильтра выпрямителя, применение диодов с малым внутренним сопротивлением, электронная стабилизация выходного напряжения выпрямителя — ведут к ослаблению паразитной обратной связи.

Наиболее эффективным способом подавления обратной связи на низших частотах является питание первых каскадов усилителя от отдельного источника. К этому способу приходится прибегать в многокаскадных усилителях с очень большим усилением и с очень низкой граничной частотой полосы пропускания.

Транзисторные усилители часто питают от химических источников тока. Как известно, их внутреннее сопротивление увеличивается по мере разряда. Измерить внутреннее сопротивление батареи крайне просто. Вольтметром измеряют напряжение холостого хода батареи $U_{\text{х.х}}$ (при отключенной нагрузке). Затем к батарее подключают амперметр и отмечают ток короткого замыкания $I_{\text{к.з}}$. Измерение тока следует производить очень быстро, чтобы батарея была замкнута накоротко всего на несколько секунд. Тогда измерение не отразится на качестве батареи. Значение внутреннего сопротивления источника питания рассчитывают по формуле

$$R_{\text{пит}} = U_{\text{х.х}}/I_{\text{к.з}}.$$

Увеличение этого сопротивления приводит к увеличению паразитной обратной связи в усилителе с течением времени. При свежих батареях усилитель работает нормально, а по мере старения батареи АЧХ постепенно изменяется. Генерация возникает в усилителе, если обратная связь положительна.

Уменьшить глубину обратной связи на низких частотах можно применением усилительных каскадов по двухтактным схемам, работающим в режиме А.

При работе двухтактного каскада в таком режиме увеличение тока потребления одного плеча сопровождается уменьшением тока потребления другого. В результате, переменная составляющая тока, определяющая падение напряжения на общей шине питания, уменьшается примерно в 5 раз по сравнению с однотактным каскадом. Ее амплитуда пропорциональна разности постоянных токов, протекающих через усилительные приборы двухтактного каскада.

8. ПАРАЗИТНАЯ ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ ПО ЦЕПЯМ УПРАВЛЯЮЩИХ НАПРЯЖЕНИЙ

В многокаскадном усилителе на электроды усилительных приборов некоторых каскадов подают напряжения для регулирования усиления или стробирования. Через цепи подачи этих напряжений могут возникать паразитные обратные связи. Ток, протекающий в цепи последнего управляемого каскада, создает падение напряжения на

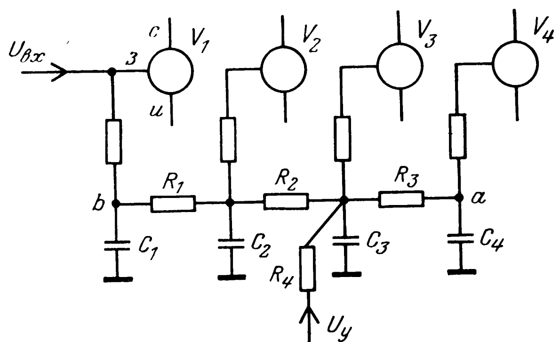


Рис. 24. Последовательная цепь развязки с неодновременным запиранием и отпиранием усилительных приборов.

общем сопротивлении источника управляющего сигнала, что оказывает влияние на предыдущие управляемые каскады. Следовательно, характер возникновения паразитных обратных связей через цепи управления такой же, как через цепи питания.

Если управляющие напряжения изменяются медленно, что обычно имеет место в системах ручного и автоматического регулирования усиления, для подавления обратных связей по цепям управления в них включают фильтрующие ячейки, подобные ячейкам основной цепи питания. Некоторая трудность заключается в том, что выходное сопротивление источника управляющего напряжения обычно значительно больше выходного сопротивления источника питания усилителя. С другой стороны, задача несколько упрощается, если регулировка усиления производится не во всех каскадах усилителя.

Если на управляющие электроды усилительных приборов подаются быстро изменяющиеся или импульсные напряжения для кратковременного запирания, отпирания этих приборов или изменения усиления, то к развязывающим цепям предъявляются два противоречивых требования: с одной стороны, они должны хорошо подавлять паразитную обратную связь, а с другой — незначительно искажать управляющие напряжения.

С точки зрения подавления обратной связи простейшим вариантом явилось бы применение развязывающей цепи, составленной из последовательно включенных RC-ячеек (рис. 24), но в каждой такой ячейке происходит временная задержка управляющего импульса $U_у$, вследствие чего усилительные приборы отпираются и запираются не одновременно. С наименьшим опозданием по отношению к входному импульсу приходит импульс на затвор прибора V_3, так как он задерживается только ячейкой R_4C_3. Импульсы на затворы приборов V_2 и V_4 поступают одновременно, но с дополнительной задержкой ячейкой R_2C_2 или R_3C_4. С еще большим запаздыванием, создаваемым ячейкой R_1C_1, поступает импульс на затвор прибора V_1.

Управляющее напряжение подается через резистор R_4, который совместно с конденсатором C_3 составляет фильтрующую ячейку, необходимую для ослабления внешних наводок. При переносе точки подключения резистора R_4 в точку a или точку b неодновременность срабатывания усилительных приборов будет еще больше.

От этого недостатка свободна параллельная цепь развязки (рис. 25,*а*); однако она хуже подавляет паразитную обратную связь.

Считая источником наводки в схеме на рис. 24 конденсатор C_4, на котором получается максимальное значение напряжения от высокочастотного тока затвора прибора V_4, получаем, что между точками a и b имеется три развязывающие ячейки: R_3C_3, R_2C_2 и R_1C_1. Схема на рис. 25,*а* содержит две ячейки: R_4C_5 и R_1C_1.

Значения R и C нужно выбирать небольшими, чтобы меньше искажались управляющие импульсы. Двух ячеек часто бывает недостаточно для развязывания точек a и b. Тогда можно применить схему, представленную на рис. 25,*б*; она обеспечивает большую развязку и одновременное управление всеми усилительными приборами. В этой схеме между точками a и b имеются 4 развязывающие ячейки: R_4C_7, R_6C_6, R_5C_5 и R_1C_1. Хотя ячейки R_2C_2 и R_3C_3 в развязке точек a и b не участвуют, исключить их нельзя, так как при этом не будет обеспечиваться одновременное управление усилительными приборами.

При проектировании развязки цепи управления с помощью RC-ячеек необходимо прежде всего определить степень влияния их

на управляющий импульс. Теоретический анализ переходных характеристик и времен задержки многозвенных RC-цепей весьма сложен. Поэтому рекомендуется производить подбор элементов развязывающих ячеек экспериментально, учитывая при этом, что емкости C_1—C_4

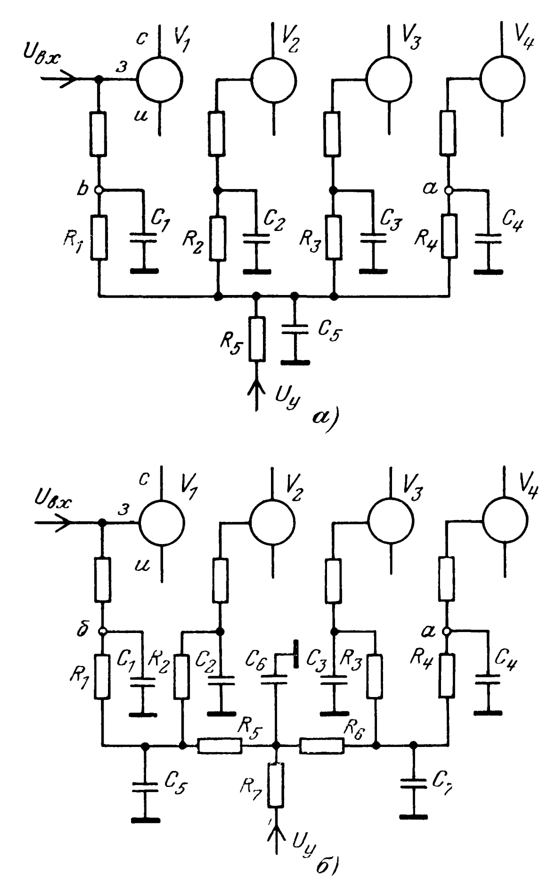


Рис. 25. Цепи развязки, обеспечивающие одновременное запирание и отпирание усилительных приборов.

а — параллельная; *б* — параллельно-последовательная.

входят последовательно, полностью или частично в резонансные контуры усилителя. Поэтому емкости эти следует выбрать как можно большими (во всяком случае они должны быть в 10—20 раз больше входных емкостей усилительного прибора). Значения сопротивлений резисторов можно определить ориентировочно, исходя из простых

соотношений, не учитывающих влияние последующих ячеек на предыдущие. Тогда для цепи, состоящей из n ячеек, время установления, отсчитываемое между уровнями 0,1 и 0,9 установившегося значения, управляющего напряжения на затворах усилительных приборов (рис. 26) будет равно:

$$t_{у} = 2{,}2RC\sqrt{n}.$$

Время задержки, отсчитываемое от момента подачи входного скачка до момента достижения 0,5 установившегося значения, равно:

$$t_{з} = RC(n - 0{,}3).$$

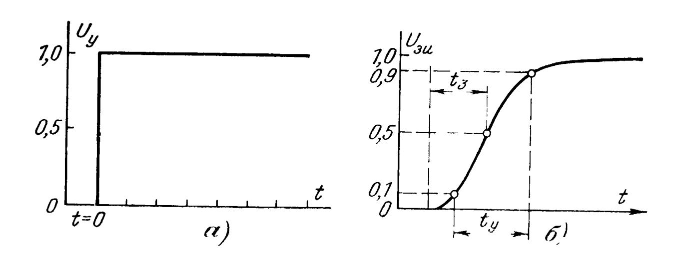


Рис. 26. Время установления и время задержки.
а — управляющий скачок; *б* — напряжение на затворе.

Рассмотренные варианты развязывающих RC-цепей можно применять в цепях управления, если время установления нормального усиления должно быть не менее 1—2 мкс. При необходимости иметь меньшее время установления RC-цепи непригодны и приходится в схемах на рис. 24 и 25 все развязывающие резисторы или часть

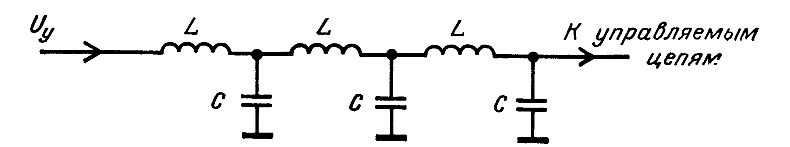


Рис. 27. LC фильтр в цепи управления.

их заменять дросселями. Цепь, состоящая из индуктивностей L и конденсаторов C (рис. 27), представляет собой П-образный фильтр нижних частот, граничная частота которого

$$f_{в} = 1/\pi\sqrt{LC}.$$

Колебания с частотами ниже $f_{в}$ проходят через фильтр почти без ослабления, а выше $f_{в}$ почти полностью подавляются.

Если на вход такого фильтра подать скачок управляющего напряжения $U_{у}$, то напряжение на затворе усилительного прибора будет возрастать значительно быстрее, чем в RC-цепи. Для одной

LC-ячейки время установления, рассчитанное по формуле

$$t_{y1} = 0,35/f_в = 0,35\pi \sqrt{LC} = 1,1 \sqrt{LC},$$

почти точно совпадает с экспериментальными результатами. С увеличением числа ячеек время установления растет медленно и для 3—5 ячеек достигает величины

$$t_{y3\text{-}5} = 1,9 \sqrt{LC}.$$

Преимущество LC-цепи перед RC-цепью состоит в том, что в ней можно применять бо́льшие емкости C_1—C_4. Это улучшает добротность резонансных контуров усилителя и обеспечивает лучшую развязку. Недостаток развязывающей LC-цепи — значительные выбросы в конце процесса установления амплитуды, достигающие $\pm 10\%$ установившегося значения, и ударное возбуждение, возникающее при перегрузке усилителя высокочастотными импульсами. В этом случае через дроссели протекает резко изменяющийся ток и в них индуцируется э. д. с., заряжающая их собственную емкость. В результате ударного возбуждения проходящий через усилитель высокочастотный импульс растягивается и его форма искажается.

Для уменьшения выбросов и устранения ударного возбуждения дроссели шунтируют резисторами, имеющими сопротивления

$$R = 0,5 \sqrt{L/C_{пар}}.$$

При этом контур, образованный индуктивностью дросселя L и его собственной распределенной паразитной емкостью $C_{пар}$, будет апериодическим, амплитуда выбросов на управляющем импульсе уменьшится в 1,5—2 раза, а время установления импульса возрастет в 1,5 раза.

9. ЕМКОСТНАЯ И ИНДУКТИВНАЯ ПАРАЗИТНЫЕ СВЯЗИ. КОНСТРУКЦИИ ЭКРАНОВ

Емкостная связь (рис. 4) является второй по значимости из рассмотренных в § 2 типов паразитной связи. Для упрощения рассуждений примем, что входное сопротивление приемника наводки является чисто емкостным, т. е. $Z_{пр} = 1/\omega C_B$. Тогда получается, что точки A и B (рис. 28,a) связаны емкостным делителем напряжения,

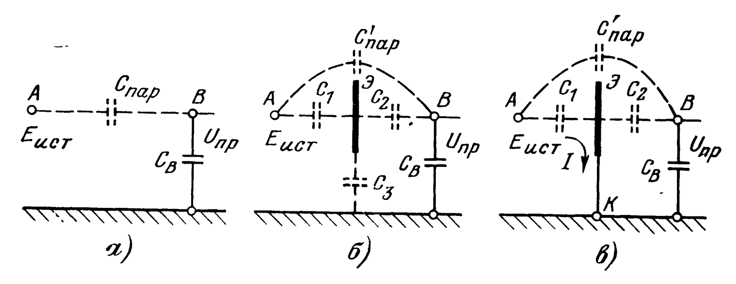


Рис. 28. Наводка в отсутствие экрана (a), при наличии экрана, не соединенного с корпусом ($б$), и при соединении экрана с корпусом ($в$).

состоящим из емкостей $C_{пар}$, C_B, и напряжение на входе приемника наводки

$$U_{пр} = E_{ист} \frac{C_{пар}}{C_B + C_{пар}}$$

не зависит от частоты. Для снижения этого напряжения необходимо уменьшать емкость $C_{пар}$ и увеличивать емкость C_B.

Если между точками A и B поместить металлический лист $Э$ (рис. 28,*б*), то емкость $C_{пар}$ разделится на две последовательно соединенные емкости C_1 и C_2, параллельно которым присоединена небольшая остаточная емкость $C'_{пар}$. Для определения напряжения $U_{пр}$, пренебрегая емкостью $C'_{пар}$, можно считать, что потенциал точки B определяется потенциалом экрана $U_э$, который заменяет в этом случае точку A на рис. 28,*а*. Согласно приведенному выше выражению,

$$U_{пр} = U_э \frac{C_2}{C_B + C_2}.$$

Исходя из тех же соображений и учитывая наличие емкости C_3 между экраном и корпусом, потенциал экрана относительно корпуса будет иметь значение

$$U_э = E_{ист} \frac{C_1}{C_3 + C_1},$$

а напряжение на входе приемника наводки при наличии экрана

$$U_{пр} = E_{ист} \frac{C_1 C_2}{(C_3 + C_1)(C_B + C_2)}$$

может быть как выше, так и ниже значения в отсутствие экрана. Действительно, сравнивая приведенные выражения для $U_{пр}$ до и после установки экрана, можно получить разные результаты.

Если экран установлен так, что его емкость относительно точки A велика, а относительно корпуса мала (т. е. $C_1 \gg C_3$), то потенциал экрана будет примерно равен потенциалу точки A относительно корпуса. Так как емкость $C_2 > C_{пар}$, напряжение на входе приемника наводки при наличии экрана будет больше, чем без него, т. е. экран оказывается вредным.

Если же экран установлен так, что его емкость C_3 относительно корпуса прибора велика, то потенциал точки B относительно корпуса при наличии экрана будет меньше, чем без него. Таким образом, с увеличением емкости C_3 экранирование становится более эффективным.

Беспредельное увеличение емкости C_3 равносильно короткому замыканию между экраном и корпусом (рис. 28,*в*). Если не учитывать остаточной паразитной емкости $C'_{пар}$ между точками A и B, напряжение $U_{пр}=0$, т. е. показанный на рис. 28,*в* экран является идеальным. В действительности $U_{пр} \neq 0$, но его значение, определяемое из соотношения

$$U_{пр} = E_{ист} \frac{C'_{пар}}{C_B + C_2 + C'_{пар}} \approx E_{ист} \frac{C'_{пар}}{C_B + C_2},$$

будет значительно меньше значения $U_{пр}$ в отсутствие экрана (так как $C'_{пар} \ll C_{пар}$). На основании изложенного можно считать, что экранирующий эффект, создаваемый металлическим листом, соединенным с корпусом прибора, заключается в уменьшении паразитной емкости между экранируемыми друг от друга точками.

Посмотрим теперь, как влияет на потенциал, наведенный в точке *B*, металлический лист, прикрывающий экранируемые друг от друга точки. Этот случай иллюстрируется рис. 29, на котором паразитные емкости, обозначены так же, как на рис. 28,*б*. Легко убедиться, что напряжение на входе приемника наводки $U_{пр}$, определяемое из тех же соображений, что и для рис. 28,*б*, при наличии листа будет значительно большим, чем без него, так как последовательно соединенные емкости C_1 и C_2 значительно больше емкости $C_{пар}$, а емкость C_3 невелика. Иная картина получится, если металлический лист соединить с корпусом прибора. Тогда емкости C_1 и C_2 оказываются подключенными к корпусу прибора и потенциал точки *B* будет определяться соотношением между емкостью $C'_{пар}$ и суммой емкостей $C_B+C_2+C'_{пар}$. Так как емкость $C'_{пар}<C_{пар}$, то очевидно, что такая крышка, соединенная с корпусом прибора, даст некоторый экранирующий эффект, хотя она не расположена между экранируемыми друг от друга точками. Экранирующий эффект будет тем выше, чем ближе расположен лист к экранируемым точкам.

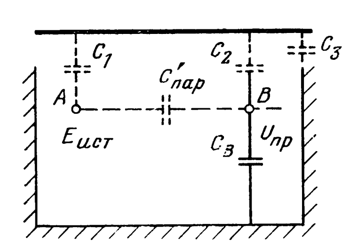


Рис. 29. Действие металлической крышки.

Различным действием соединенного и не соединенного с корпусом металлического экрана можно легко объяснить хорошо известное явление, заключающееся в том, что приближение руки к открытому монтажу увеличивает наводки и приводит часто к самовозбуждению усилителя или к искажению его АЧХ. Если же приближать руку к монтажу, то генерация часто уменьшается или вовсе не возникает. Причина этого явления кроется в том, что рука играет роль экрана, который в отсутствие соединения с корпусом увеличивает паразитную связь между различными точками монтажа, а в присоединенном состоянии наоборот, уменьшает связь.

Следовательно, для экранирования электрического поля следует применять металлические перегородки и кожухи, соединенные с корпусом (шасси) прибора. От способа соединения экрана с корпусом прибора существенным образом зависит его экранирующее действие. Длинные соединительные провода между экраном и корпусом совершенно недопустимы. Индуктивное сопротивление такого проводника (рис. 30) с повышением частоты возрастает, что эквивалентно уменьшению емкости C_3 на рис. 28,*б* и 29. На коротковолновом и особенно УКВ диапазонах соединительные проводники длиной в несколько сантиметров могут резко ухудшить экранирующий эффект.

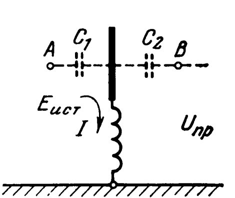


Рис. 30. Влияние индуктивности провода, соединяющего экран с корпусом.

Узкие щели и отверстия в металлической перегородке не ухудшают экранирование электрического поля, если их размеры малы по сравнению с длиной волны. Это объясняется тем, что такие щели и отверстия лишь незначительно изменяют паразитные емкости, опре-

деляющие наведенное напряжение в точке *В*. Если же размеры щелей и отверстий сравнимы с длиной волны, то между экранируемыми элементами может возникнуть связь через электромагнитное поле.

Эффективность экранирования электрического поля не зависит от толщины экрана, поскольку значения токов, текущих по экрану, незначительны. Как видно из рис. 28,*в*, значение тока, текущего по цепи *АЭК*, определяется сопротивлением малой емкости C_1, которое при хорошем соединении экрана с корпусом прибора несравненно больше сопротивления экрана и корпуса с большими поверхностями.

Индуктивная паразитная связь (рис. 5) возникает значительно реже, чем связь через общее сопротивление и емкостная. Для устранения или уменьшения индуктивной связи прибегают к экранированию магнитного поля. От постоянного и медленно изменяющегося переменного магнитных полей защищаются с помощью экранов, изготовленных из ферромагнитных материалов с большой относительной магнитной проницаемостью μ (пермаллой, сталь). Линии магнитной индукции проходят в основном по стенкам такого экрана (рис. 31), магнитное сопротивление которых мало по сравнению с магнитным сопротивлением воздушного пространства внутри экрана. Качество экранирования таких полей зависит от магнитной проницаемости и магнитного сопротивления экрана. Последнее тем меньше, чем толще экран и чем меньше в нем стыков и швов, расположенных перпендикулярно направлению линий магнитной индукции. Этот вид экранирования назовем шунтированием магнитного поля экраном.

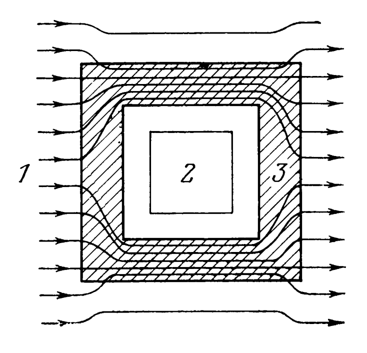


Рис. 31. Шунтирование магнитного поля источника наводки ферромагнитным экраном.
1 — линии поля; 2 — приемник наводки; 3 — экран.

Экранирование высокочастотного магнитного поля чаще всего производят с помощью экранов, изготовленных из немагнитных металлов. Оно основано на использовании явления магнитной индукции, которое приводит к возбуждению наведенных э. д. с. и токов. Если на пути равномерного переменного магнитного поля (рис. 32,*а*) расположить медный цилиндр (рис. 32,*б*), то в нем возбудится переменная э. д. с., которая, в свою очередь, создаст в экране индукционные вихревые токи. Магнитное поле этих токов будет замкнутым: внутри цилиндра оно направлено навстречу возбуждающему полю, а за его пределами — в ту же сторону, что и возбуждающее поле. Результирующее поле (рис. 32,*в*) оказывается ослабленным у цилиндра и усиленным вне его, т. е. происходит вытеснение поля из пространства, занимаемого цилиндром. В этом и заключается его экранирующее действие; оно тем больше, чем больше создаваемое цилиндром обратное магнитное поле, т. е. чем больше протекающие по нему вихревые токи. Этот вид экранирования будем называть вытеснением магнитного поля экраном.

Вихревые токи в экранирующем цилиндре распределяются неравномерно по его сечению. Это вызывается явлением поверхностно-

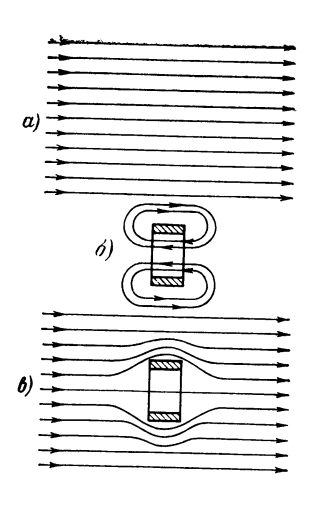


Рис. 32. Вытеснение магнитного поля экраном.

а — переменное поле источника наводки; *б* — переменное поле экранирующего цилиндра; *в* — результирующее переменное поле.

го эффекта; сущность его, как известно, заключается в том, что напряженность переменного магнитного поля по мере проникания в глубь металла ослабляется, так как внутренние слои экранируются вихревыми токами, циркулирующими в поверхностных слоях. Вместе с тем по мере углубления в металл уменьшается плотность вихревых токов.

Поверхностный эффект характеризуется эквивалентной глубиной проникания x_0. Это глубина, на которой плотность тока в $e=2{,}72$ раза меньше плотности тока на поверхности металла (e — основание натуральных логарифмов); значение x_0 принято выражать в сантиметрах. Так как уменьшение плотности тока до значения, равного $1/2{,}72=0{,}37$ плотности на поверхности, недостаточно для характеристики экранирующих свойств материала, пользуются также величинами $x_{0,1}=2{,}3x_0$ и $x_{0,01}=4{,}6x_0$, определяющими глубины, на которых плотность тока составляет 0,1 и 0,01 плотности тока на поверхности. Очевидно, что чем меньше значение x_0, тем большая часть тока течет в поверхностных слоях экрана, тем больше создаваемое им обратное магнитное поле, вытесняющее из пространства, занятого экраном, внешнее поле источника наводки, тем выше экранирующий эффект.

Эквивалентная глубина проникания x_0 зависит от следующих факторов:

а) с повышением частоты f экранируемого поля растут вихревые токи, индуктированные в теле экрана, поэтому величина x_0 обратно пропорциональна $\sqrt{f}$;

б) с увеличением удельного сопротивления ρ металла, из которого изготовлен экран, вихревые токи в нем уменьшаются, вследствие этого величина x_0 пропорциональна $\sqrt{\rho}$;

в) если экран изготовлен из немагнитного металла, то экранирующий эффект определяется только удельным сопротивлением последнего и частотой экранируемого поля. Когда же экран изготовлен из ферромагнитного материала с относительной магнитной проницаемостью μ, то при прочих равных условиях внешнее поле будет индуцировать в нем большую э. д. с. вследствие большей концентрации магнитных силовых линий. Как следствие этого, увеличатся вихревые токи, что приведет к уменьшению глубины проникания тока. В результате величина x_0 обратно пропорциональна $\sqrt{\mu}$.

В приводимой ниже таблице даны значения эквивалентной глубины проникания для различных экранирующих материалов. Из этих данных следует, что на частотах выше 0,5 МГц экран из любого металла толщиной 0,5—1,5 мм действует весьма эффективно. При выборе толщины и материала экрана следует исходить не из электрических свойств материала, а руководствоваться соображениями его механической прочности, массы, жесткости, стойкости против

коррозии, удобства стыковки отдельных деталей и осуществления между ними переходных контактов с малым сопротивлением, удобства пайки, сварки и пр.

Металл	Удельное сопротивление ρ, Ом/(мм²/м)	Относительная магнитная проницаемость μ	Частота f, Гц	Эквивалентная глубина проникания, мм		
				x_0	$x_{0,1}$	$x_{0,01}$
Медь	0,0175	1	10^5 10^6 10^7 10^8	0,210 0,067 0,021 0,0067	0,490 0,154 0,049 0,0154	0,980 0,308 0,098 0,0308
Латунь	0,06	1	10^5 10^6 10^7 10^8	0,390 0,124 0,039 0,0124	0,900 0,285 0,090 0,0285	1,800 0,570 0,180 0,057
Алюминий	0,03	1	10^5 10^6 10^7 10^8	0,275 0,088 0,0275 0,0088	0,640 0,200 0,064 0,020	1,280 0,400 0,128 0,040
Сталь	0,10	50	10^5 10^6 10^7 10^8	— 0,023 0,007 0,0023	— 0,053 0,016 0,0053	— 0,106 0,032 0,0106
Сталь	0,10	200	10^2 10^3 10^4 10^5	1,100 0,350 0,110 0,035	2,500 0,800 0,250 0,080	5,00 1,60 0,50 0,16
Пермаллой	0,65	12 000	10^2 10^3 10^4 10^5	0,380 0,120 0,038 0,012	0,850 0,270 0,085 0,027	1,70 0,54 0,17 0,054

Из данных таблицы следует также, что для $f > 10$ МГц медная и тем более серебряная пленка толщиной около 0,1 мм обеспечивает значительный экранирующий эффект. Поэтому на частотах выше 10 МГц допустимо применение экранов из фольгированного гетинакса или другого изоляционного материала с медным или серебряным покрытием.

Значения глубины проникания для стали с относительной магнитной проницаемостью $\mu = 50$ показывают, что и на высоких частотах сталь дает больший экранирующий эффект, чем немагнитные металлы. Однако экраны из стали могут вносить значительные потери в экранируемые цепи вследствие большого удельного сопротивления и явления гистерезиса. Поэтому такие экраны применяют только в случаях, когда с вносимыми потерями можно не считаться.

Листовую сталь в качестве сердечников высокочастотных катушек не применяют, так как она вносит весьма большие потери. В этих катушках используют сердечники из ферритов или магнитодиэлектриков, которые вносят малые потери. Существует ошибочное мнение, что значение μ листовой стали резко падает с повышением частоты. Однако малое изменение индуктивности при внесении в катушку сердечника из листовой стали вызывается не столько малым значением μ, сколько размагничивающим действием вихревых токов. В диапазоне частот 10—100 МГц магнитная проницаемость стали изменяется мало и не может быть ниже 50.

Приведенные в таблице значения глубин проникания для стали и пермаллоя являются ориентировочными. Они даны для малых значений μ, что позволяет наиболее наглядно сравнивать глубины проникания для магнетиков со значениями этого же параметра для немагнитных материалов. Для точных расчетов приводимые в таблице параметры не пригодны, так как существует много марок стали и пермаллоя с другими значениями μ, зависящими также от напряженности магнитного поля, в котором находится материал. Отметим, что целесообразность точного расчета экранирующего материала весьма сомнительна.

10. ОДНОВРЕМЕННОЕ ЭКРАНИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО И МАГНИТНОГО ПОЛЕЙ

Металлические экраны практически ослабляют как электрическое, так и магнитное переменные поля. Для эффективного использования этих свойств экранов необходимо учитывать следующее.

1. Токи, протекающие по экрану под влиянием магнитного поля, значительно больше токов, наблюдаемых при экранировании электрического поля. Причиной этого является то, что токи, возбуждаемые в экране магнитным полем, протекают в поверхностном слое экрана, сопротивление которого невелико, в то время как в цепь тока, протекающего при экранировании электрического поля, всегда входит большое сопротивление паразитной емкости между экранируемой точкой и экраном.

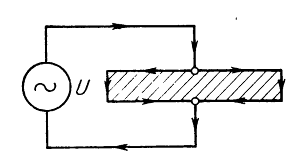


Рис. 33. Поверхностный эффект в пластине с идеальной проводимостью.

2. Эффективность электрического экрана почти целиком определяется надежностью электрического контакта между экраном и корпусом устройства. При экранировании магнитного поля соединение экрана с корпусом совершенно не изменяет величины возбуждаемых в экране токов и, следовательно, на эффективность магнитного экранирования не влияет.

3. Изменение частоты не влияет на действие электрического экрана; незначительно влияет и удельная проводимость материала, из которого изготовлен экран. Эффективность магнитного экранирования целиком зависит от частоты. Чем ниже частота, тем слабее действует магнитный экран, тем большей толщины приходится его делать для достижения одного и того же экранирующего эффекта.

4. Внутри проводника с бесконечно большой проводимостью не могут существовать переменные электрические и магнитные поля.

На рис. 33 показана пластина из идеального проводника, к которой приложено переменное напряжение: токи протекают по ее поверхности, не проникая в глубь металла, хотя путь по поверхности пластины значительно длиннее. В реальном проводнике с конечной проводимостью поверхностный эффект проявляется в меньшей степени, чем в идеальном, и состоит в уменьшении значения тока по мере удаления от поверхности проводника в соответствии со значениями коэффициентов проникания, приведенными в таблице. Не следует считать коротким присоединение к разным сторонам экрана.

5. Если через отверстие в пластине из идеального проводника (рис. 34) пропустить провод, несущий ток высокой частоты, то в пластине возбудятся поверхностные токи такой силы и такого направления, что результирующая сумма токов, протекающих через

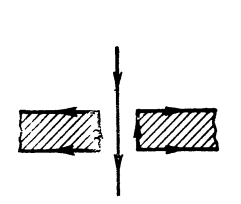


Рис. 34. Проводник с током, пропущенным через отверстие в идеально проводящей пластине.

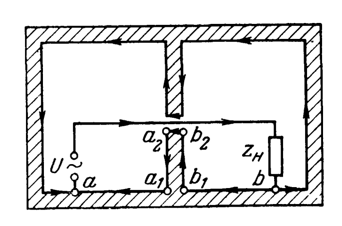


Рис. 35. Возникновение в экране блуждающих токов.

поперечное сечение отверстия, будет равна нулю. Это необходимо учитывать при установке перегородки, разделяющей экранируемое пространство на два отсека (рис. 35). В таком экране возникают блуждающие токи, создающие разность высокочастотных потенциалов между отдельными точками экрана. При постепенном сближении точек a и b токи, протекающие по более коротким путям, будут медленно увеличиваться и уменьшаться все остальные Если соединения с корпусом сделать в точках a_1 и b_1, то блуждающие токи останутся значительными, особенно в перегородках между отсеками. Только соединение с корпусом в точках a_2 и b_2 позволит освободить его от блуждающих токов. Сказанное верно для частот, на которых влиянием емкостей цепи ab и включенных в нее деталей относительно корпуса можно пренебречь. На более высоких частотах к показанным на рис. 35 токам добавляются емкостные токи и любое перемещение точек a и b не избавит от блуждающих токов.

6. Если на пути переменного магнитного потока (рис. 36) расположить лист из идеального проводника с отверстием, то суммарный магнитный поток через отверстие будет равен нулю. Это означает, что число магнитных силовых линий, выходящих из отверстия, равно числу линий, входящих в него.

7. Отверстия малых размеров почти не ухудшают качество экрана, так как магнитное поле, проникающее через малое отверстие, можно обнаружить только вблизи него (рис. 36). Паразитная емкость, связывающая через электрическое поле экранируемые друг от друга точки, также почти не зависит от наличия таких отверстий.

Длинные узкие щели, допустимые в электрическом экране, опасны в магнитном экране, если они расположены перпендикулярно направлению вихревых токов (рис. 37). Когда экранируются сложные электрические цепи, направления магнитных потоков в которых могут быть самыми разнообразными, длинных щелей следует избегать.

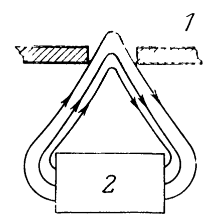


Рис. 36. Прохождение магнитного потока через отверстие в металлическом листе.

1 — металлический лист; 2 — источник переменного магнитного поля.

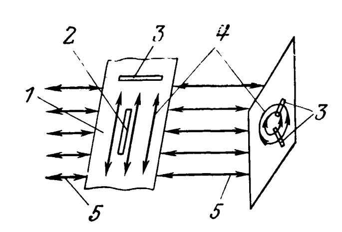


Рис. 37. Влияние длинных узких щелей в экране.

1 — экран; 2 — «неопасная» щель; 3 — «опасные» щели; 4 — вихревые токи; 5 — силовые линии магнитного потока.

Для этого крышки и экраны желательно скреплять между собой и с корпусом прибора так, чтобы длины возможных щелей были не более 0,1—1% длины волны. Это важно и для экранирования электрического поля, так как от качества контакта между частями экрана почти целиком зависит эффективность электрического экрана.

11. ЭКРАНИРОВАНИЕ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ И ТРАНСФОРМАТОРОВ ПИТАНИЯ

В трансформаторе с магнитопроводом из ферромагнитного материала основной магнитный поток замыкается в магнитопроводе и только небольшая его часть (поток рассеивания) проникает в окружающее пространство и является причиной паразитных наводок. Любые меры, связанные с уменьшением рассеивания магнитного потока трансформатора, приводят одновременно к уменьшению паразитных наводок. Отсюда следует, что наиболее эффективным экраном трансформатора является его магнитопровод.

Применение магнитопровода из материала с высоким относительным коэффициентом магнитной проницаемости и уменьшение в нем немагнитных зазоров уменьшают паразитные наводки. Минимальное рассеяние имеют трансформаторы с тороидальными магнитопроводами, в которых каждая обмотка равномерно распределена по окружности тороида.

Кроме индуктивной паразитной связи через поток рассеивания, трансформатор может иметь емкостную паразитную связь с любой деталью усилителя. Присоединение магнитопровода к корпусу позволяет значительно уменьшить паразитную связь. В этом случае магнитопровод трансформатора выполняет функцию электрического экрана, действие которого рассмотрено в § 9. Максимальное уменьшение емкостной связи достигают соединением с корпусом в одной

точке всех металлических деталей трансформатора (конечно, кроме обмоток). Практически обычно достаточно подключить к корпусу лишь часть деталей трансформатора. Например, в трансформаторе броневого типа удобно соединить с корпусом крайние Ш-образные пластины, если магнитопровод стягивается болтами и металлическими накладками. В трансформаторах массового производства предпочитают обходиться без болтов и опрессовывают магнитопровод обоймой. В такой конструкции можно соединить с корпусом только обойму, которая и будет частично экранировать электрическое поле.

В усилителях нередко имеется 2 или 3 трансформатора: входной, выходной и трансформатор питания. Паразитная связь между входным и выходным трансформаторами при большом усилении устройства недопустима. Если в конструкцию усилителя входит трансформатор питания, то паразитная связь между ним и входным трансформатором также недопустима, так как по этой связи на вход усилителя подаются фон с частотой тока электросети и внешние помехи. Поскольку связь через электрическое и магнитное поля уменьшается с увеличением расстояния, входной и выходной трансформаторы располагают возможно дальше друг от друга. Трансформатор питания также следует устанавливать как можно дальше от входного трансформатора. Для уменьшения магнитной связи нужно ориентировать трансформаторы друг относительно друга так, чтобы оси их катушек были взаимно перпендикулярны (рис. 38). Если усилитель смонтирован на стальном шасси, то часть магнитных потоков трансформаторов питания и выходного может через шасси проникнуть в магнитопровод входного трансформатора, вызвав значительные наводки. Для предохранения от них входной трансформатор в усилителе с большим усилением крепят на стальном шасси с немагнитной (металлической или изоляционной) прокладкой.

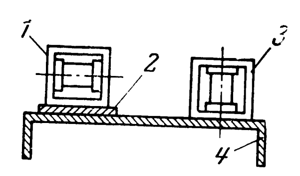


Рис. 38. Размещение низкочастотных трансформаторов на стальном шасси.

1 — входной трансформатор; *2* — прокладка из немагнитного материала; *3* — трансформатор питания или выходной; *4* — стальное шасси.

Дальнейшего уменьшения внешнего магнитного поля трансформатора достигают дополнительным его экранированием. При этом поле рассеивания трансформатора может не уменьшиться. Экранирование ослабляет только внешнее поле трансформатора, не уменьшая его рассеивания в пределах экрана. Иногда экран даже ухудшает параметры трансформатора, внося в него дополнительные потери.

Для выбора материала экрана удобно пользоваться кривыми, снятыми экспериментально в диапазоне частот от 50 Гц до 4 кГц (рис. 39). При снятии этих кривых трансформатор помещался во внешнее переменное магнитное поле и измерялась э. д. с. E_0, наво-

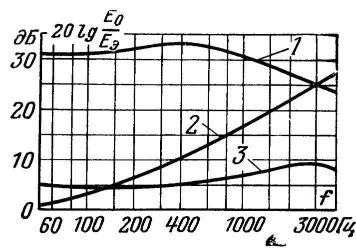


Рис. 39. Эффективность экранов из различных материалов.

1 — пермаллой толщиной 0,8 мм, $\mu=500$; *2* — медь толщиной 1,6 мм, *3* — кремнистая сталь толщиной 0,8 мм.

димая на одной из его обмоток в отсутствие экрана, и э. д. с. $E_э$, наводимая в той же обмотке при экранировании трансформатора медной, пермаллоевой или стальной прямоугольной коробкой. Под эффективностью экранирования принимают отношение этих э. д. с., выраженное в децибеллах и равное $20 \lg E_0/E_э$. Как видно из рис. 39, кремнистая сталь является плохим экраном во всем рассматриваемом диапазоне частот.

Крышки и коробки из стали с малой магнитной проницаемостью не следует рассматривать как магнитный экран, они защищают трансформатор от механических повреждений, могут служить электрическими экранами, уменьшающими паразитную емкость обмоток трансформаторов по отношению к другим деталям усилителя, оставшуюся после присоединения магнитопровода к корпусу. Для получения этого эффекта необходимо обеспечить хорошее соединение экрана с корпусом усилителя. Еще лучше между магнитопроводом трансформатора и коробкой сделать зазор в виде изоляционной прокладки толщиной около 3 мм, соединив коробку и магнитопровод в одной точке. В такой конструкции имеется двойной электрический экран: первым, внутренним экраном является магнитопровод трансформатора, а остаточное поле экранируется наружной коробкой.

Из той же диаграммы на рис. 39 следует, что медная (и тем более алюминиевая) экранирующая коробка на частотах ниже 100—150 Гц совершенно неэффективна. Это объясняется тем, что на указанных частотах вытеснение магнитного поля экраном мало, а медный экран магнитное поле не шунтирует. С повышением частоты эффективность медной экранирующей коробки возрастает и на частотах выше 2—4 кГц ее можно успешно применять, если не требуется экранирование полей более низких частот.

В диапазоне частот 50 Гц — 4 кГц эффективны экраны из пермаллоя и других ферромагнитных материалов с высокой магнитной проницаемостью и малым удельным сопротивлением. При конструировании такого экрана следует учесть сказанное выше о желательности зазора между коробкой и магнитопроводом трансформатора и о соединении их с корпусом в одной точке. Этим обеспечивается двойное экранирование и электрического и магнитного полей.

Более высокую эффективность экранирования трансформатора (до 80—100 дБ) достигают применением сложных многослойных экранов, составленных из магнитных и немагнитных металлов. Обзор действия и конструкции таких экранов даны в работе [1].

В низкочастотных трансформаторах и трансформаторах питания часто стремятся устранить емкостную связь между первичной и вторичными обмотками, что позволяет снизить уровень наводок и помех, проникающих в усилитель извне. Значительно уменьшает емкостную связь разомкнутый виток из медной фольги, прокладываемый между обмотками по всей длине катушки трансформатора. Виток соединяют с магнитопроводом трансформатора и с корпусом прибора; действует такой виток как электрический экран. Иногда вместо витка из фольги применяют однослойную экранирующую намотку, один конец которой изолируют, а другой соединяют с корпусом. В устройствах, работающих на частотах до нескольких мегагерц; экранирующая обмотка действует хорошо. На более высоких частотах виток из фольги эффективнее экранирующей обмотки, если только шина, служащая для соединения его с корпусом, обладает малой индуктивностью.

12. ПАРАЗИТНЫЕ СВЯЗИ ПО ЦЕПЯМ ВКЛЮЧЕНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ И ПО «ПОСТОРОННИМ» ПРОВОДАМ

Режимы каскадов и узлов усилителей и радиоприемников контролируют двумя способами. Если в контролируемой цепи имеется резистор с известным небольшим сопротивлением, то к нему подключают вольтметр со значительно бóльшим сопротивлением. Зная сопротивление резистора и падение напряжения на нем, можно определить значение тока, протекающего в контролируемой цепи. Если резистора в цепи нет, приходится включать миллиамперметр в разрыв цепи.

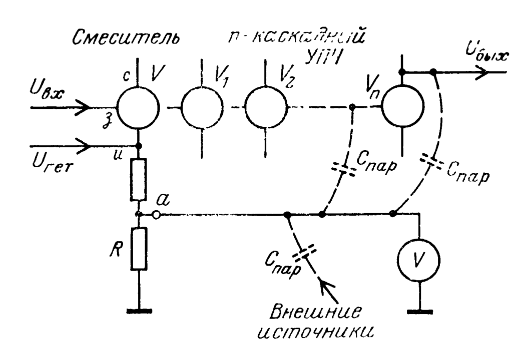


Рис. 40. Паразитные связи через цепь подключения вольтметра.

В обоих случаях подключение измерительного прибора может нарушить нормальную работу усилителя. На рис. 40 показано подключение вольтметра к контрольной точке *a* цепи триодного смесителя. Здесь измеряется падение напряжения на резисторе *R* в цепи истока, служащем для стабилизации режима и получения начального смещения на затворе.

Измерительный прибор при этом сильно связан с наиболее чувствительной входной цепью. Провода, идущие к измерительному прибору, могут быть длинными, особенно если прибор включается в цепи усилителя постоянно и размещается на пульте или щите, удаленном от смесителя. При большом коэффициенте усиления достаточно весьма малой емкости $C_{пар}$, через которую внешние источники наводки свяжутся с входными цепями усилителя, чтобы на выходе усилителя получились повышенный уровень шума и отдельные выбросы. Еще хуже получается при недостаточном экранировании и фильтрации цепей последних каскадов усилителя и детектора. В этом случае емкость $C_{пар}$ и провода измерительного прибора образуют цепь паразитной обратной связи выхода усилителя с его входом, что приводит к самовозбуждению усилителя или к изменению его частотных характеристик.

Паразитные обратные связи по той же причине могут возникнуть, если рядом с деталями различных каскадов усилителя расположен общий «посторонний» провод.

Для подавления паразитной связи в провод, соединяющий точку a с вольтметром (рис. 40), как можно ближе к входу усилителя нужно включить не пропускающий наводки фильтр.

Конструктивное выполнение этого фильтра не сложно, так как через него проходит только постоянный ток. Поэтому максимальная степень фильтрации со стороны низких частот в нем не ограничивается. Дроссели фильтра должны иметь малое сопротивление постоянному току, чтобы они не влияли на результаты измерения.

Число ячеек фильтра и его параметры рассчитывают на необходимое ослабление $M > 100\,K$, где K — полный коэффициент усиления по промежуточной частоте. В этом расчете предполагается, что коэффициент связи между выходным каскадом усилителя и цепью измерительного прибора или посторонним проводом равен единице. В действительности он значительно меньше, что дает запас в подавлении обратной связи.

Индуктивности и емкости фильтра выбирают возможно большими. При этом собственная резонансная частота дросселя получается близкой к номинальной частоте усилителя.

13. УЧЕТ ПАРАЗИТНЫХ СВЯЗЕЙ В УСИЛИТЕЛЯХ

Шасси, корпус или другое металлическое основание усилителя гальванически соединяет различные точки его деталей. При отсутствии металлического корпуса прокладывают общую шину — разветвленный объемный или печатный проводник, который далее будем называть также «корпус».

Каждая деталь и провод усилителя имеют некоторую емкость относительно корпуса или соединяются с ним непосредственно. Под влиянием переменных напряжений на деталях усилителя в поверхностном слое корпуса протекает множество токов в самых разнообразных направлениях. Кроме того, в этом слое протекают вихревые токи, вызванные переменным магнитным полем катушек и проводов. В зависимости от величины активного и реактивного сопротивлений поверхностного слоя корпуса между различными его точками возникают разности потенциалов, которые, в свою очередь, могут передаваться в любые другие цепи усилителя, имеющие гальваническую, емкостную или индуктивную связь с корпусом, вызывая этим паразитную связь различных элементов усилителя друг с другом. Очевидно, что сопротивление общей шины, заменяющей или дополняющей металлические конструкции в единой системе корпуса, будет повышенное. Поэтому общие шины всегда опасны с точки зрения увеличения паразитных связей.

Обратная связь через корпус тем сильнее, чем выше рабочая частота усилителя, так как с повышением частоты возрастают переменные токи в корпусе, протекающие через емкости монтажа и деталей.

На частотах от нескольких десятков килогерц до единиц мегагерц разность потенциалов между различными точками поверхности шасси настолько мала, что ее можно считать эквипотенциальной и следовательно, не создающей паразитной связи. Поэтому в усилителях, работающих в указанных диапазонах частот, мер защиты от паразитной обратной связи по шасси не принимают. Если же усилитель собирают на печатной плате, то корпусную шину стараются делать как можно более разветвленной, максимально возможной ширины. В таких усилителях контурные катушки обычно имеют

сящиеся к другим каскадам усилителя. Все эти условия наилучшим образом удается выполнить, если расположить каскады один за другим по прямой линии в отдельном узле, устанавливаемом на общем шасси прибора. Такую конструкцию принято называть «линейкой» промежуточной или высокой частоты. Токи в поверхностном слое корпуса линейки, относящиеся к любому каскаду усилителя, замыкаются в пределах данного каскада, не захватывая мест установки и соединения с корпусом деталей, относящихся к другим каскадам. Дополнительным преимуществом размещения каскадов в линейку является максимальное снижение емкостных и индуктивных связей между входными и выходными цепями по сравнению с любым другим вариантом конструктивного оформления усилителя. Действительно, здесь входной и выходной каскады расположены на максимально возможном расстоянии друг от друга, а общий экран отделяет усилитель от остальных деталей и монтажных проводов прибора, которые могут служить причиной случайной связи между входными и выходными цепями усилителя.

Не рекомендуется располагать каскады широкополосного усилителя с большим усилением на общем металлическом шасси вместе с другими узлами прибора. При таком размещении паразитные обратные связи возрастают главным образом за счет токов в поверхностном слое шасси, которые, распространяясь по большой поверхности, также могут связывать входные, выходные и промежуточные цепи усилителя. Емкостные связи также увеличиваются из-за наличия вблизи усилителя посторонних деталей и проводов и сближения первого каскада с последним. При размещении усилителя на общем шасси прибора экранирование его в целом или частями обычно малоэффективно, так как большая часть указанных причин увеличения паразитных обратных связей остается и после установки экранов. Очевидно, что недопустимо располагать каскады усилителя в два ряда.

Благодаря малым размерам деталей и выгодному их размещению в усилительной линейке емкостные и индуктивные связи между каскадами настолько малы, что дополнительного экранирования отдельных каскадов и катушек индуктивности обычно не требуется. Только при очень малом расстоянии между контурными катушками полезно устанавливать между ними небольшую перегородку, приваривая или припаивая ее не менее чем к двум стенкам линейки. Она может устранить паразитные связи в пределах одного-двух каскадов.

Промежуточные экраны неудачной конструкции могут быть причиной увеличения паразитной связи.

Хорошо сконструированная усилительная линейка благодаря малой величине обратных связей работает устойчиво. В серийном производстве при идентичном монтаже линейки характеризуются высокой повторяемостью параметров.

14. КОНСТРУИРОВАНИЕ ШИРОКОПОЛОСНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ

При конструировании широкополосного усилителя нужно учитывать, что паразитную обратную связь с его выхода на вход может создать общий кожух, даже при хорошем электрическом контакте между ним и платой (корпусом) по всему периметру. Пусть четыре отсека *А*, *Б*, *В* и *Г* (рис. 42), экранированные друг от друга пере-

относительно большие размеры, а контуры, в которые они входят — большую добротность. Возможность возникновения паразитных емкостной и индуктивной связей между катушками различных каскадов усилителя велика. Все эти условия определяют конструкцию усилителя, который монтируют нередко на общей плате с другими частями радиоприемника. Катушки помещают в броневые сердечники из феррита или магнитодиэлектрика, резко уменьшающие рассеивание их магнитных потоков, или контуры целиком заключают в экран — металлические стаканы. Иногда применяют неэкранированные катушки, располагая их на разных сторонах шасси или печатной платы, которые в этом случае служат экраном.

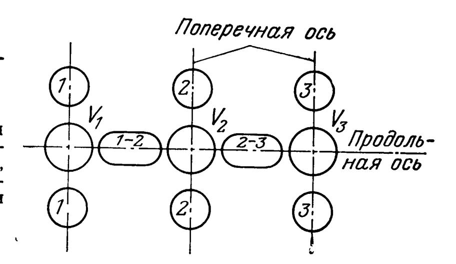


Рис. 41. Размещение деталей в широкополосном усилителе.

1, 2, 3 — области размещения деталей, относящихся к одному усилительному прибору; *1-2, 2-3* — области размещения деталей, относящихся к соседним усилительным приборам.

В усилителях низкой частоты и в видеоусилителях паразитная обратная связь через корпус маловероятна. При наличии в усилителях трансформаторов и дросселей возможна емкостная и индуктивная связь между ними, во избежание которой их удаляют друг от друга и иногда экранируют. Особое внимание обращают на разделение входных и выходных деталей и трансформаторов в многокаскадных усилителях с большим усилением: входной и выходной каскады размещают на максимальном расстоянии, удаляют друг от друга и экранируют выводы входных и выходных проводов, устанавливают трансформаторы в соответствии с рис. 38.

Таким образом, при конструировании усилителей на частоты вплоть до 5—10 МГц, выполняемых на любых типах усилительных приборов, достаточно учесть приведенные рекомендации. Вместе с тем конструктор должен исходить из соображений снижения стоимости аппарата, удобства монтажа, регулировки, смены деталей и т. д.

Иначе обстоит дело в широкополосных усилителях высокой и промежуточной частоты, работающих на частотах выше 5 МГц. Здесь токи, протекающие в поверхностном слое корпуса, могут быть причиной значительного ухудшения устойчивости усилителя. Для устранения паразитных обратных связей по корпусу усилителя все детали, провода и точки присоединения к корпусу, относящиеся к выходу и входу двух соседних по принципиальной схеме усилительных приборов, необходимо размещать только в промежутке между ними, возможно ближе к продольной осевой линии (рис. 41). Детали, провода и точки соединения с корпусом, относящиеся к подсобным цепям (исток, эмиттер, катод, делитель смещения и др.) одного усилительного прибора, следует размещать как можно ближе к поперечной оси корпуса. Между усилительными приборами даже на довольно большом расстоянии от продольной оси недопустимо размещать детали, провода и точки присоединения к корпусу, отно-

городками, имеют общую крышку с хорошими контактами по периметру в точках *1* и *6*. При снятой крышке (рис. 42,*а*) источники наводки *и*, расположенные в отсеках *А* и *Б*, связаны с приемниками наводки *п*, расположенными в отсеках *В* и *Г*, через паразитные емкости C_1, C_2, C_3 и C_4. Когда крышка установлена (рис. 42,*б*), между ней и точками *и* и *п* образуются емкости C'_1, C'_2, C'_3 и C'_4. При относительно низкой частоте, на которой влияние индуктивного сопротивления крышки и переходного сопротивления контактов в точках *1* и *6* незначительно, эти емкости оказываются соединенными с корпусом и крышка почти полностью устраняет паразитные наводки.

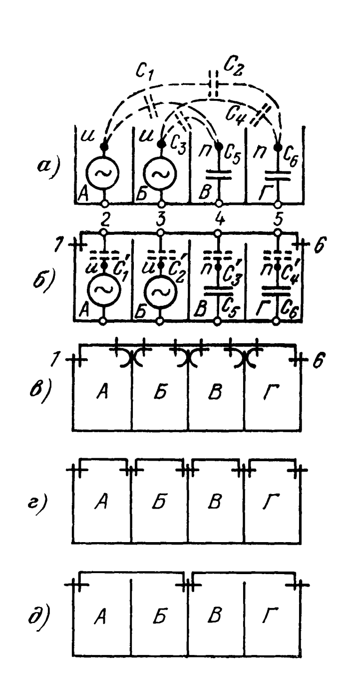


Рис. 42. Паразитная связь через общую крышку.

На высоких и особенно ультравысоких частотах точки *и* и *п* оказываются связанными через те же емкости C'_1, C'_2, C'_3 и C'_4 и индуктивные делители напряжения, образованные крышкой. Так, например (см. рис. 42,*б* и 43), напряжение источника наводки, находящегося в отсеке *А*, через первый делитель, состоящий из емкости C'_1 и индуктивности $L_{2,1}$, участка крышки *2-1*, через второй делитель, состоящий из индуктивностей $L_{2,5}$ и $L_{5,6}$, участков крышки *2-5* и *5-6*, и через третий делитель, составленный из емкостей C'_4 и

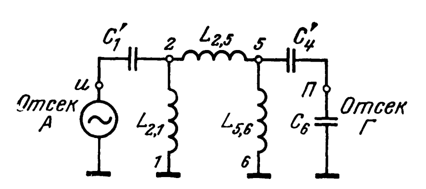


Рис. 43. Эквивалентная схема паразитной связи через крышку, соединенную с корпусом.

C_6, передается в отсек *Г*, в котором находится приемник наводки. Так как емкости C'_1, C'_2, C'_3 и C'_4 значительно больше емкостей C_1, C_2, C_3 и C_4, применение общей крышки для экранированных отсеков может не ослабить паразитную связь, а даже увеличить ее, несмотря на хороший контакт между крышкой и корпусом.

Для устранения паразитной связи этого вида к крышке часто приклепывают пружинные контактные губки (рис. 42,*в*), обеспечивающие контакт с промежуточными перегородками почти по всему их периметру. Однако такая конструкция имеет следующие недостатки:

а) требуется точная установка перегородок и губок, чтобы обеспечить их сопряжение;

б) возможно повреждение губок при установке крышки;

в) для изготовления губок необходимо применять хорошо пружинящий металл;

г) паразитная связь устраняется неполностью вследствие того, что участок, состоящий из переходных контактов *1*, *2*, *3* и *4* (рис. 44), шунтирован участком крышки *ab*.

От этих недостатков свободна конструкция, показанная на рис. 42,*г*, где каждый отсек имеет отдельную крышку. Кроме того, в этой конструкции не обязательно иметь хороший контакт по всей поверхности соприкосновения крышки с экранируемым отсеком; достаточно прикрепить ее в нескольких точках.

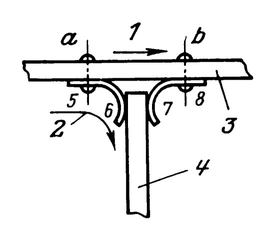


Рис. 44. Остаточная паразитная связь при применении контактных губок.

1 — прямой связывающий ток; *2* — развязывающий ток; *3* — крышка; *4* — перегородка; *5—8* — переходные контакты между крышкой и перегородкой.

Если известно, что источники наводок находятся в отсеках *А* и *Б*, а приемники наводок в отсеках *В* и *Г* или что связь между конкретными отсеками менее опасна, чем связь между другими отсеками, конструкцию можно упростить, применив общие крышки для двух или более отсеков (рис. 42,*д*).

Корпусы радиоэлектронной аппаратуры обычно имеют металлические крышки и другие части, служащие не для экранирования, а для крепления и предохранения деталей и монтажа от повреждений. При конструировании аппаратуры необходимо учитывать, что эти конструктивные элементы влияют на экранирование даже на самых низких частотах. Неудачное размещение вблизи от источника и приемника наводки не соединенной с корпусом металлической детали может быть причиной возникновения паразитной связи через нее. Во избежание этого следует обеспечивать надежный контакт с корпусом всех нетоконесущих деталей. Съемные детали по всему периметру соприкосновения должны иметь металлическое покрытие, не подверженное коррозии. Несъемные детали рекомендуется приваривать или припаивать. Соединения с помощью винтов и заклепок можно применять только в крайних случаях.

Удобное крепление крышек получается при Н-образном шасси (рис. 45,*а*), когда детали размещены на верхней и нижней части средней платы. Не следует делать сплошные перегородки поперек шасси, отделяющие каскады друг от друга. При этом получаются узкие, глубокие отсеки, затрудняющие монтаж и ремонт, увеличивается число проходных изоляторов. В то же время для устранения паразитных связей сплошные перегородки не нужны. Такие перегородки (одну-две на всю линейку) имеет смысл ставить в местах стыка кры-

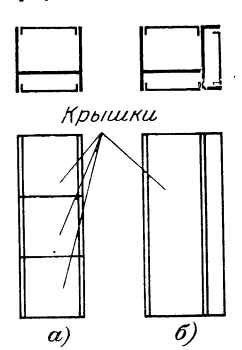


Рис. 45. Принципы конструкции шасси линеек.

а — рациональная, Н-образная; *б* — излишне усложненная.

шек. Тогда получаются достаточно просторные и удобные отсеки.

Конструирование шасси сложной конфигурации со специальным отсеком для проводов питания (рис. 45,*б*) нецелесообразно. Такая конструкция осталась от прежних времен, когда применяли только параллельную схему фильтрации и прокладывали провода питания вдоль всего усилителя, что не обеспечивало должной фильтрации. На рис. 46 для примера показано размещение транзисторов и резонансных контуров усилителя высокой частоты, при котором используется каскодное включение транзисторов по схеме ОЭ-ОБ. Малые внутренние паразитные обратные связи, имеющие место в подобных усилителях, позволяют получить значительное устойчивое усиление. В конструкциях широкополосных усилителей удается обходиться без соединительных проводов в цепях, находящихся под большим высокочастотным потенциалом относительно корпуса. Это достигается непосредственным соединением деталей друг с другом или на общем опорном изоляторе.

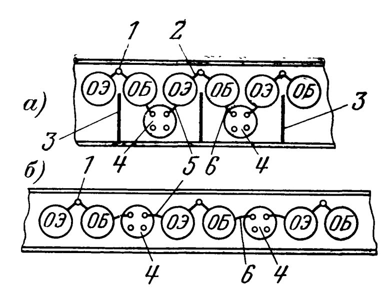


Рис. 46. Размещение деталей в транзисторной линейке, выполненной по каскодной схеме ОЭ-ОБ с междукаскадными экранами (*а*) и без экранов (*б*).

1 — опорный изолятор; *2* — соединение вывода коллектора транзистора, включенного по схеме ОЭ, с выводом эмиттера транзистора, включенного по схеме ОБ; *3* — экранирующая перегородка; *4* — резонансный контур; *5* — вывод базы; *6* — вывод коллектора.

15. ПРАВИЛА МОНТАЖА УСИЛИТЕЛЕЙ

Чем выше рабочие частоты усилителя, тем большая часть токов, протекающих в его цепях, ответвляется в корпус. С повышением частоты увеличивается индуктивное сопротивление соединительных проводов. Оба эти фактора являются причиной того, что чем выше частота, тем сильнее отражаются на работе усилителя паразитные связи, вызванные неудачным монтажом.

Емкости контуров в широкополосных усилителях состоят в основном из входных и выходных емкостей усилительных приборов и емкости монтажа. Эти емкости имеют распределенный характер и протекающие через них токи достигают корпуса в самых разнообразных точках. Пути прохождения токов в поверхностном слоем корпуса определяются в основном размещением деталей и проводов и только в незначительной степени зависят от присоединения этих деталей и проводов к корпусу.

При монтаже усилителя нужно стремиться к уменьшению емкости монтажа, индуктивности соединительных проводов и взаимосвязи между деталями. При монтаже необходимо строго выполнять следующие основные правила.

1. Длина всех соединительных проводов должна быть минимальной.

2. Провода и детали, соединяемые с входом и выходом усилительных приборов, нужно располагать возможно дальше от шасси, стенок и кожухов.

3. Провода, входящие во входные и выходные цепи усилительных приборов, должны иметь минимальный диаметр, допустимый по соображениям механической прочности; по возможности следует обходиться без проводов, непосредственно соединяя детали между собой.

4. Для подключения контурных катушек и других деталей к выводам электродов усилительных приборов не следует применять дополнительные подпорки, проходные и опорные изоляторы и другие подобные конструкции. Применяемые в крайних случаях изоляторы должны иметь минимальную емкость на корпус.

5. Детали следует соединять с корпусом проводами минимальной длины в точках, возможно более близких к присоединяемой детали. Контурный конденсатор следует присоединять непосредственно к катушке.

6. Каждая деталь должна соединяться с корпусом с помощью отдельного лепестка. Если материал шасси допускает пайку, то лучше лепестками не пользоваться, а производить пайку непосредственно к шасси. Это упрощает сборку усилителя и позволяет уменьшить длину соединительных проводов.

7. Провода питания и управления, проходящие вдоль всего усилителя, должны быть разделены на участки фильтрующими ячейками. Посторонние провода (цепи реле, измерительных приборов и др.) также следует разделять фильтрующими ячейками или, в крайнем случае, тщательно экранировать от основных цепей усилителя.

8. Если устройство, работающее в диапазоне метровых волн с коэффициентом усиления 60 дБ и выше, выполняется на печатной плате, то корпусная шина (экран) должна быть широкой и разветвленной; желательна полная металлизация одной стороны платы.

При тщательно продуманном монтаже с учетом приведенных выше рекомендаций каждую деталь следует соединять с корпусом шиной на ближайшем лепестке или на пистоне, металлизирующем отверстие в плате. В таком монтаже почти отсутствуют соединительные провода и устройство отличается высокой надежностью и малыми паразитными емкостями. Необходимо только, чтобы выводы отдельных деталей и пистоны в плате были приспособлены для одновременной пайки 3—4 проводников.

Рекомендации, изложенные в п. 5 и 6, противоречат рекомендациям, встречающимся в литературе. Некоторые авторы предлагают соединять детали с шасси (корпусом) усилителя в одной или двух точках, объединяя в этих точках цепи так, чтобы получить минимальные токи в поверхностном слое шасси. При этом не учитывается, что в широкополосном усилителе токи в шасси зависят главным образом от распределенных емкостей, а не от точек присоединения проводов к корпусу. Поэтому практически невозможно представить действительную картину прохождения токов в шасси. Небольшие преимущества, которые можно получить при правильном выборе и объединении точек соединения с корпусом, теряются при нерациональном соединении, особенно если при этом приходится удлинять монтажные проводники. В то же время рекомендуемое здесь соединение с корпусом непосредственно у деталей является наиболее безошибочным, так как оно объединяет все токи в шасси, вызываемые данной деталью.

При монтаже узкополосных усилителей, работающих на значительно более низких частотах, контуры которых содержат большие сосредоточенные емкости (усилители низкой частоты, видеоусилите-

ли), указанные выше правила монтажа также желательно соблюдать, хотя здесь они необязательны.

16. КОНСТРУКЦИЯ, МОНТАЖ И РАЗМЕЩЕНИЕ ФИЛЬТРОВ СОСРЕДОТОЧЕННОЙ СЕЛЕКЦИИ

Применение фильтров сосредоточенной селекции (ФСС) на входах усилителей промежуточной частоты, а также усилителей высокой частоты с фиксированной настройкой снижает уровень помех от других станций и уменьшает опасность появления перекрестных искажений. Другим преимуществом усилителей с ФСС по сравнению с усилителями с распределенной селекцией, в которых для связи всех соседних усилительных приборов применены одноконтурные или двухконтурные фильтры, является более высокая степень прямоугольности частотной характеристики при том же числе контуров, что повышает общую избирательность приемника по соседнему каналу. Это получается потому, что в усилителях с распределенной селекцией все контуры шунтированы входными и выходными сопротивлениями усилительных приборов, а при необходимости расширения полосы — резисторами. В ФСС в таком положении находятся только первый и последний контуры. Затухание промежуточных контуров ФСС практически определяется только их собственными потерями и может быть сделано достаточно малым.

Схемы, число ячеек и параметры ФСС в зависимости от предъявляемых к ним требований могут быть различными. Вопросы расчета фильтров освещены во многих книгах, в частности в работе [3].

Теоретически ФСС можно рассчитать почти на любую полосу пропускания и почти на любую величину ослабления за пределами этой полосы. Практически достижение расчетных параметров целиком определяется конструкцией, монтажом и размещением фильтра, которые должны исключать возможность паразитного прохождения сигналов помимо фильтра или отдельных его ячеек.

Чем выше рабочая частота фильтра, тем труднее обеспечить это требование.

Одна из возможных конструкций ФСС с центральной частотой полосы пропускания порядка десятков мегагерц показана схематически на рис. 47,*а*. Его контуры расположены в одну линию в корпусе с равномерно впаянными или приваренными перегородками. Корпус прикрывают двумя или тремя отдельными крышками без губок или одной общей крышкой с губками.

Рис. 47. Размещение *LC*-контуров фильтра сосредоточенной селекции: однолинейное (*а*) и шахматное (*б*).

1 — корпус; 2 — *LC*-контуры; 3 — экранирующие перегородки.

В конструктивном варианте, представленном на рис. 47,*б*, длина фильтра уменьшается благодаря шахматному расположению контуров и расширению корпуса. Соединять корпус фильтра с корпусом усилителя в нескольких точках нежелательно, так как токи, проте-

кающие по корпусам, могут создать паразитную связь, ухудшающую параметры системы смеситель — ФСС — усилитель ПЧ по сравнению с параметрами ФСС.

Функциональные узлы этой системы рекомендуют выполнять в виде отдельных экранированных секций, соединяя корпус смесителя с корпусом ФСС в одной точке около входа ФСС, а корпус усилителя ПЧ с корпусом ФСС также в одной точке около выхода ФСС [1].

При конструировании ФСС для усилителей на более низкие частоты также следует пользоваться изложенными выше рекомендациями, что гарантирует получение расчетных параметров. Если контурные катушки выполнить на сердечнике броневого типа, внутренние перегородки окажутся излишними. К другим упрощениям конструкции фильтра следует подходить крайне осторожно. Особенно опасны комбинации с общими платами и общими проводами присоединения к корпусу, которые могут резко ухудшить работу фильтра. Следует также учитывать, что чем ниже центральная частота полосы пропускания фильтра, тем больше глубина проникновения тока в экран (см. § 9) и тем больше вероятность смешения токов, протекающих в корпусе ФСС, с токами в корпусах смесителя и усилителя. Поэтому и на относительно низких частотах важно соблюдение приведенных выше рекомендаций об отдельных экранированных секциях и о соединении корпусов только в двух точках [2].

17. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ПОДАВЛЕНИЯ ПАРАЗИТНЫХ СВЯЗЕЙ

Экспериментальные работы, направленные на подавление паразитных наводок, следует начинать с нахождения источников наводки, приемников наводки и цепей паразитной связи. Для этого необходимо, непрерывно наблюдая наводку на индикаторе, подключенном

---

[1] Фильтры сосредоточенной селекции усилителей промежуточной частоты изображения телевизионных приемников, центральная частота полосы пропускания которых имеет значение 35 МГц, выполняют по более сложным схемам, поскольку задачей этих ФСС является получение АЧХ специальной формы, при которой обеспечивается не только требуемая избирательность, но и определенные соотношения уровней сигналов изображения и звукового сопровождения [4, 5]. Колебательные контуры таких ФСС настраивают на различные частоты с помощью подвижных цилиндрических карбонильных сердечников катушек индуктивности. Последние вместе с контурными конденсаторами заключают в индивидуальные алюминиевые экраны. Контуры с наиболее разнесенными частотами настройки в некоторых телевизорах размещены в экранах попарно, что дает возможность сократить габариты усилителя ПЧ. (*Прим. ред.*)

[2] К числу упоминаемых здесь автором фильтров сосредоточенной селекции относятся ФСС транзисторных радиовещательных приемников промышленного производства со стандартной промежуточной частотой 465 кГц. Катушки индуктивности этих ФСС имеют броневые ферритовые сердечники, которые заключены в индивидуальные алюминиевые экраны. Такие конструктивные узлы имеются в продаже и с успехом используются радиолюбителями в своих конструкциях. (*Прим. ред.*)

к выходу, делать и проверять те или иные предположения о конкретных ее источниках, приемниках и цепях паразитной связи.

Для проверки достоверности сделанного предположения необходимо упростить схему, т. е. исключить из нее все элементы, не участвующие в предположении. Если при этом наводка не исчезает, то предположение делается почти достоверным. Тогда следует подробно рассмотреть весь предполагаемый путь прохождения наводки, выясняя последовательно на каждом участке какие элементы входят в систему источник — цепь связи — приемник наводки. В процессе такого выяснения приходится отключать. и замыкать накоротко некоторые цепи. Полезно также для выяснения характера наводки вводить в различные цепи фильтрующие дроссели и конденсаторы, подбирая их параметры в соответствии с характером фильтруемой наводки. Если в системе имеются штепсельные разъемы, то для экспериментирования удобно изготовить экранированную коробку с LC-фильтрами и ответными частями штепсельного разъема на входе и выходе коробки.

Обычно выясняется в процессе экспериментирования наиболее простой и надежный способ подавления наводки. Необходимо предостеречь от подавления наводок без углубления в физический смысл процессов путем более или менее случайных проб и переделок. Хотя такая методика позволяет в некоторых случаях быстро устранить наводку, но, как правило, она приводит к длительному безрезультатному экспериментированию. Залог успеха в этом деле заключается в том, чтобы, отвлекшись от практической задачи — подавления наводки, тщательно проанализировать физическую сущность процесса и исследовать его полностью. Излишний и несвоевременный практицизм в большинстве случаев не упрощает дело, а затягивает исследования на большой срок. Для того чтобы быстро и качественно подавить наводку, нужно разобраться в физике ее прохождения.

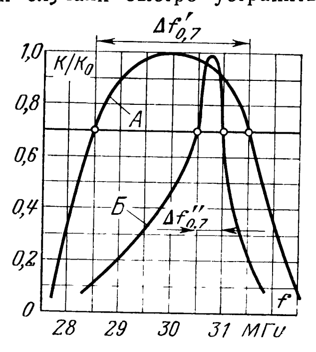


Рис. 48. Расчетная (*А*) и экспериментальная (*Б*) АЧХ усилителя промежуточной частоты.

Если наводка проникает в приемник по нескольким путям, через разные входные цепи, проверка правильно предположенного пути прохождения наводки может дать отрицательный результат, если по этому пути проходит меньшая часть наводки. Повторение проверки после подавления основной части наводки может дать положительный результат. В таких сложных случаях проверку сделанных предположений необходимо вести особенно тщательно, учитывая любые незначительные изменения уровня наводки и не отказываясь от многократного повторения экспериментов.

Подавление наводки всегда выгоднее производить у ее источника, так как это гарантирует отсутствие наводки не только на данный конкретный приемник, но и на все другие, которые могут обнаружиться в дальнейшем. Если наводка поступает на приемник по входным цепям вместе с полезными сигналами и на тех же частотах, подавление наводки у источника является единственным способом

избавления от нее. Во всех остальных случаях, для большей надежности, желательно подавлять наводку как у ее источника, так и у приемника.

В § 1 и на рис. 2 показано влияние паразитной обратной связи на АЧХ усилителя НЧ. Примером также могут служить изображенные на рис. 48 расчетная и экспериментальная АЧХ усилителя промежуточной частоты, охваченного глубокой паразитной обратной связью. Увеличение усиления на одних частотах и снижение на других вызваны различными фазами напряжения обратной связи на различных частотах. Полоса пропускания устройства $\Delta f_{0,7}$, исходя из данных расчетной кривой $\Delta f'_{0,7}$, составляет 3 МГц, а по экспериментальной кривой $\Delta f''_{0,7}$ составляет 0,5 МГц. Если при этом немного изменить глубину обратных связей, то полоса пропускания $\Delta f''_{0,7}$ расширится в несколько раз.

Из выражения для коэффициента усиления усилителя с обратной связью $K_{о.с}=K/(1-\beta K)$ следует, что при неизменной величине β отношение $K/K_{о.с}=1-\beta K$ тем ближе к единице, чем меньше величина K. Следовательно, если в усилителе с глубокой обратной связью (с большим значением β) уменьшить усиление, то его АЧХ будет близка к той, которую он имел бы в отсутствие обратных связей.

Снятие и сравнение АЧХ усилителя при полном и уменьшенном усилении является наиболее рациональным способом проверки степени подавления обратных связей. При снятии характеристик необходимо, чтобы усилитель был полностью подготовлен к работе и нигде не имел нарушений экранировки. Подключая индикатор выходного напряжения к выходным зажимам усилителя, нужно тщательно проверять, не создает ли такое подключение дополнительных обратных связей. Входное напряжение следует подавать на вход усилителя, прибегая к подаче его на промежуточные точки только в крайних случаях и тщательно проверяя, не вносит ли такая подача дополнительных обратных связей. В начале проверки необходимо убедиться в отсутствии связи между входными и выходными приборами.

Для сравнения АЧХ при полном и сниженном усилении удобно пользоваться измерителями частотных характеристик с генераторами качающейся частоты, позволяющими визуально наблюдать на экране электроннолучевой трубки частотные характеристики. Нужно убедиться в том, не создает ли генератор дополнительной паразитной обратной связи. Не существенно, если генератор качающейся частоты искажает форму АЧХ, так как важно знать только ее относительное изменение при изменении коэффициента усиления.

При отсутствии измерителя частотных характеристик исследование усилителя иногда проводят на одной частоте (например, средней), на которой проверяют действие тех или иных блокировок, развязок и экранов. При этом предполагается, что если подключение данного экранирующего элемента приводит к снижению выходного напряжения усилителя при постоянном входном, то этот элемент снижает обратные связи. Как видно из сказанного выше, такая проверка может привести к ошибочным результатам, так как, снижая усиление на одной частоте, блокировка может оказывать противоположное действие на другой частоте. Проверку действия экрана следует производить путем измерения АЧХ при полном и уменьшенном усилении. В тех случаях, когда такое измерение из-за большого объема работы затруднительно, можно ограничиться для промежуточных опытов измерением полосы пропускания или сравнением усиления на двух различных частотах.

Сравнивая АЧХ, снятые при полном и уменьшенном усилении, необходимо иметь в виду, что и в отсутствие внешних обратных связей характеристики всегда получаются несколько различными. Это вызывается внутренними обратными связями через проходную проводимость усилительного прибора, которая полностью неустранима, а также тем, что регулирование усиления связано с изменением входных и выходных проводимостей усилительного прибора.

В радиолюбительской, а иногда и в инженерной практике, для подавления обратных связей заземляют шасси усилителя (соединяют шасси с шиной, подключенной к трубам водопровода). Вместо заземления можно пользоваться металлическим листом, устанавливая на нем испытываемые приборы. Для объяснения влияния заземления нужно учесть, что отдельные детали плохо экранированного усилителя имеют емкостную связь с проводами электросети, трубами центрального отопления и водопровода и другими объектами. Последние могут увеличивать паразитную связь между элементами усилителя, действуя подобно крышке, не соединенной с шасси (рис. 29). Заземление шасси, устраняя частично внешние емкостные связи, лишь перераспределяет паразитные явления в усилителе. Подавление обратных связей таким способом бесполезно, так как он эффективен только в данной конкретной обстановке. Если усилитель перенести в другое помещение или на другое место, действие заземления шасси оказывается иным.

Заземление шасси усилителя влияет на работу плохо или неправильно экранированного усилителя. Заземление или подключение любых предметов к корпусу хорошо экранированного усилителя на его работе не отражается. Проверкой влияния заземления на параметры усилителя можно воспользоваться для грубой оценки качества его экранирования.

Подавление паразитных обратных связей в усилителе рекомендуется вести в следующем порядке:

1. Тщательно проверяют монтаж, убеждаются в наличии и исправности всех деталей, в отсутствии случайных соединений, могущих создать паразитную связь.

2. Определяют примерно каскады, охваченные паразитной обратной связью. Для этого следует снять АЧХ при полном и уменьшенном усилении, подавая сигнал от измерительного генератора сначала на вход усилителя, затем на вход первого каскада, вход второго каскада и т. д. до нахождения каскада, начиная с которого, АЧХ, снятые при полном и уменьшенном усилении, более или менее совпадают.

3. В соответствии с результатами, полученными согласно п. 2, намечают пути улучшения экранирования, обратив внимание на следующее:

в узкополосных усилителях — на индуктивную связь между входом и выходом и в последнюю очередь на развязывание цепей питания;

в широкополосных резонансных усилителях — на связь по цепям накала, через общие крышки экрана, по проводам питания коллекторов, эмиттеров, анодов и сеток, на связь вследствие неправильного размещения деталей и соединения их с корпусом, не соответствующего приведенному на рис. 41, наконец, на индуктивную связь между катушками;

в усилителях НЧ и видеоусилителях — на искажение АЧХ, вызванного неправильным учетом входной проводимости усилительного

прибора, связь через сопротивление источников питания, паразитную генерацию на СВЧ (особенно при параллельном соединении усилительных приборов).

4. Выполняют сразу все намеченные улучшения и производят проверку устройства. Не рекомендуется вносить и проверять отдельные улучшения, так как это может привести к неверным результатам и сильно затянуть работу.

Экспериментальные работы, связанные с подавлением обратных связей, сложны, длительны и часто приводят к необходимости переделки усилителя. Учитывая это, при разработке конструкции усилителя экранирование следует выполнять с некоторым запасом, тем более что этот запас лишь незначительно повысит стоимость усилителя. Экономить на экранировании выгодно только при конструировании аппаратуры, рассчитанной на массовый выпуск, для которой значительное усложнение разработки окупается небольшим удешевлением конструкции.

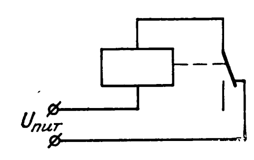


Рис. 49. Использование электромагнитного реле для выявления дефектов в экранировании усилителя.

Окончательную проверку усилителя после подавления в нем паразитных обратных связей следует проводить при максимальном усилении и при повышенных напряжениях питания. Это гарантирует надежную работу усилителя при использовании усилительных приборов, параметры которых близки к верхней границе допусков.

Усилители низкой частоты и усилители постоянного тока, питающиеся от химических источников тока, необходимо проверять также на отсутствие самовозбуждения и искажения АЧХ при большом внутреннем сопротивлении источника питания $R_{пит}$, которое он может иметь к концу срока службы.

Усилители низкой частоты и видеоусилители с большим усилением, совмещенные конструктивно с различными автоматическими и импульсными устройствами (реле, блокинг-генераторы, импульсные модуляторы), подвержены импульсным наводкам. Характер и параметры цепи паразитной связи определяют искажения формы наведенных импульсов на выходе усилителя. В работе [1] подробно разобрана зависимость этих искажений от параметров цепи паразитной связи. Этот материал может быть полезен при поиске цепи связи, подлежащий подавлению.

Усилители, на выходе которых возникают импульсные наводки, необходимо проверять на достаточность общей экранировки и фильтрации всех выводящих из экрана проводов. Простейшим прибором для такой проверки является зуммер. Его можно изготовить из электромагнитного реле (рис. 49), зуммер подсоединяют длинными проводами к источнику тока, подносят ко всем щелям в экране усилителя, ко всем соединительным проводам и наблюдают наличие помех на выходе усилителя. Таким способом легко обнаружить дефекты экранировки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Волин М. Л.** Паразитные процессы в радиоэлектронной аппаратуре. М., «Советское радио», 1972.

2. **Волин М. Л.** Паразитные связи и наводки. М., «Советское радио», 1965.

3. **Калихман С. Г., Левин Я. М.** Основы теории и расчета радиовещательных приемников на полупроводниковых приборах. М., «Связь», 1969.

4. **Бриллиантов Д. П.** Расчет и конструирование портативных транзисторных телевизоров. М., «Связь», 1971. (Библиотека Телевизионный и радиоприем. Звукотехника», вып. 60).

5. **Ельяшкевич С. А.** Телевизоры. М., «Энергия», 1974 (Массовая радиобиблиотека, вып. 841).

СОДЕРЖАНИЕ

Цена 17 коп.